
Entwicklung einer Prüf- und Bewertungsmethodik für Ladungssicherungssysteme

Am Fachbereich Maschinenbau der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Kamil Klonecki, M.Sc.
aus Frankfurt am Main

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr. tech. Hermann Steffan

Tag der Einreichung: 24.04.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2017

Darmstadt 2017

D 17

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Frankfurt am Main, den 23. April 2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte der Dissertation wurden maßgeblich im Rahmen des durch das LOEWE Programm geförderten Kooperationsprojektes „Ladungssicherung von mit Schüttgutgefüllten Bigbags“ mit der EURSOSAFE GmbH erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebietes Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt und Doktorvater meiner Arbeit. Die konstruktiven Diskussionen und die wertvollen Anregungen sowie das in mich gesetzte Vertrauen und die mir gewährten gestalterischen Freiräume haben nicht nur zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, sondern haben in der Zeit bei FZD meine persönliche Entwicklung geprägt.

Herrn Prof. Dr. tech. Hermann Steffan, Leiter des Instituts für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Des Weiteren danke ich der Hessen Agentur für die Finanzierung des Projektes im Rahmen des LOEWE-Programms. Ferner möchte ich mich bei dem Kooperationspartner, der EURSOSAFE GmbH, insbesondere bei Herrn Wolfgang Neumann, für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Danken möchte ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik einschließlich des Sekretariats. Die angenehme Atmosphäre und das freundschaftliche Miteinander werde ich in guter Erinnerung behalten. Mein besonderer Dank gilt der FZD-Werkstatt, insbesondere Robert Korndörfer und Sven Müller, ohne die die praktische Umsetzung meines Prüfverfahrens nicht möglich gewesen wäre. Mein Dank gilt auch den von mir betreuten Studenten, die im Rahmen studentischer Arbeiten und als wissenschaftliche Hilfskräfte einen wertvollen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Familie, die mir in jeder Lebenslage mit Rat und Tat zur Seite standen und mir so den notwendigen Rückhalt gegeben haben, den von mir angestrebten Lebensweg zu bestreiten.

Kamil Klonecki

Frankfurt am Main, April 2017

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungen.....	VIII
Formelzeichen und Indizes	IX
Kurzzusammenfassung	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Grundlagen Ladungssicherung	4
1.2.1 Vorschriften zur Ladungssicherung.....	4
1.2.2 Anforderungen an die Ladungssicherung	5
1.2.3 Bestandteile der Ladungssicherung.....	5
1.2.4 Grundlegende Arten der Ladungssicherung	8
1.3 Eingrenzung der Thematik	9
1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit.....	10
2 Analyse des Stands der Technik und Forschung.....	11
2.1 Erfahrungsbasierte Verfahren	11
2.2 Modellbasierte Verfahren	12
2.2.1 Quasi-statisch (Konventionell).....	12
2.2.2 Semi-dynamisch.....	14
2.2.3 Volldynamisch.....	14
2.3 Experimentelle Verfahren	16
2.3.1 Prüfstandversuche	16
2.3.2 Fahrversuche	21
2.4 Vertikale Vibrationen und deren Wirkung	31
2.5 Fazit zum Stand der Technik	33
3 Anforderungen an Ladungssicherungssysteme.....	35
3.1 Fehlerbaumanalyse Beförderungssicherheit.....	35
3.2 Fehlerbaumanalyse Betriebssicherheit	38
3.2.1 Gefährdung von Personen	39
3.2.2 Unzulässige Verschiebung des Ladungsschwerpunktes.....	40
3.2.3 Impulsaustausch Ladung/Fahrzeug.....	47
3.2.4 Bewegung der Ladung	50
3.2.5 Potenzial der Sicherungsmaßnahmen	53

3.3	Fazit und Diskussion der Ergebnisse.....	57
4	Lastfälle.....	59
4.1	Einführung.....	59
4.2	Dekomposition der Transportbelastungen.....	61
4.2.1	Richtung und Amplitudenhöhe	63
4.2.2	Dauer.....	67
4.2.3	Gradient der Beschleunigung.....	68
4.2.4	Anzahl der Beschleunigungsrichtungswechsel.....	70
4.2.5	Häufigkeit der Belastung	71
4.2.6	Vorkonditionierung der Ladung	72
4.2.7	Vertikale Vibrationen	72
4.3	Fazit und Diskussion zu den Ergebnissen	77
5	Testwerkzeug	79
5.1	Hydraulisches Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK)	80
5.1.1	Grundlegende Beschreibung.....	80
5.1.2	Abbildung der vertikalen Beschleunigungen.....	81
5.1.3	Abbildung der horizontalen Beschleunigungen.....	85
5.1.4	Aufnahme der Ladung	87
5.2	Messsysteme.....	88
5.2.1	Ladung/Ladeinheit	88
5.2.2	Ladungssicherungshilfsmittel und -einrichtungen.....	90
5.3	Konzeptverifikation und -validierung	90
5.3.1	Versuchsaufbau	91
5.3.2	Transportbelastungen und ihre Reproduzierbarkeit.....	92
5.3.3	Messergebnisse	95
5.4	Fazit und Diskussion zu den Ergebnissen	95
6	Fazit und Ausblick	97
6.1	Fazit.....	97
6.2	Ausblick.....	100
A	Anhang.....	101
A.1	Übersicht über die Vorschriften zur Ladungssicherung	101
A.2	Virtuelle Fahrversuche: Parameter	102
A.3	Virtuelle Fahrversuche: Ergebnisse.....	106
A.4	Vertikale Lastkollektive.....	116
A.5	Unebenheitenprofil.....	122
A.6	Versuchsergebnisse.....	122
A.7	Maximale Beschleunigung	124

Literaturverzeichnis	125
-----------------------------------	------------

Eigene Veröffentlichungen	134
Betreute studentische Arbeiten	135
Lebenslauf.....	137

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
<i>ABS</i>	Anti-Blockier-System
<i>CTU</i>	Cargo Transport Unit
<i>FIBC</i>	Flexible Intermediate Bulk Container
<i>FTA</i>	Fault Tree Analysis
<i>LVP</i>	Lastverteilungsplan
<i>RMS</i>	Root Mean Square

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s ²	Beschleunigung
b	m	Abstand zweier Kräfte bzw. Länge einer Streckenlast
B	-	Belastung (allgemein)
BC	N	Blocking Capacity
BE	-	Beanspruchbarkeit (allgemein)
c	N/m	Federsteifigkeit
D	kg m ² /s	Drall
e	-	Einheitsvektor
E	J	Energie
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
g	9,81 m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
J	kg m ²	Massenträgheitsmoment
l	m	Länge
L	m	Periodenlänge
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
r	m	Radius
s	-	Stichprobenstandardabweichung
SSF	-	Static Stability Factor
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
V	-	Verzerrungstensor
w	m	Spurweite
X	-	Innere Beanspruchung
z	m	Höhe einer Straßenunebenheit
α	rad	Winkel
β	rad	Schwimmwinkel
Δx	m	Longitudinale Verschiebung
Δy	m	Laterale Verschiebung
ε	-	Dehnung
θ	rad	Nickwinkel
μ	-	Reibwert
ρ	m	Hebelarm/Abstand (Abstandsvektor)
σ	-	Standardabweichung
τ	s	Zeitdauer
φ	rad	Wankwinkel
ψ	rad	Gierwinkel
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

Index	Beschreibung
Aufprall	Verursacht durch den Aufprall
bel	voll beladenes Fahrzeug
dyn	dynamisch
Feder	Feder
fzg	Fahrzeug
ges	gesamt
h	hinten
HA	Hinterachse
i	Laufvariable
kin	kinetisch
La	Ladung
Ladelücke	Abstand zwischen einer Ladung und einem formschlüssigen Sicherungsmittel
Lasi	Ladungssicherungsmittel
leer	unbeladenes Fahrzeug
Lf	Ladefläche
max	maximal
min	minimal
R	Reibung
res	resultierend
S	Schwerpunkt
stat	stationär
TUL	Transpost Umschlag und Lagerung
v	vorne
VA	Vorderachse
wirk	wirkend (bezogen auf das Ladungskoordinatensystem)
x	in x-Richtung (entspricht Fahrzeug-Longitudinalrichtung)
y	in y-Richtung (entspricht Fahrzeug-Lateralrichtung)
z	in z-Richtung
zul	zulässig

Kurzzusammenfassung

Logistikunternehmen stehen in der heutigen Zeit zunehmend unter Kosten-, Termin- und Leistungsdruck. Um unter diesem Druck zu bestehen, sind die beteiligten Unternehmen unter anderem auf einen kosteneffizienten Transport angewiesen. Grundvoraussetzung hierfür ist eine hinreichende Ladungssicherung, mit der teure Warenschäden vermieden bzw. reduziert werden. Die momentan angewendeten Methoden zur Auslegung und Bewertung von Ladungssicherungsmaßnahmen sowie die daraus resultierenden Sicherungsmethoden beruhen größtenteils auf über 25 Jahre alten, praktischen Erfahrungen und empirischen Erkenntnissen. Bei den Auslegungs- und Bewertungsverfahren stand und steht nicht die vollständige Abbildung der Realität im Vordergrund, sondern die Einfachheit bei der Durchführung. Folglich ist zu bezweifeln, ob mit diesen Methoden eine ökonomische und sicherheitstechnische Optimierung von Ladungssicherung möglich ist und somit auch, ob diese Methoden den steigenden Anforderungen hinsichtlich Transporteffizienz gewachsen sind. Gegenstand dieser Dissertation ist daher die wissenschaftliche Analyse von Ladungssicherung im Straßenverkehr und die Entwicklung einer entsprechenden generischen Prüf- und Bewertungsmethodik.

In einer Analyse des Stands der Technik und Forschung im Bereich Ladungssicherung wird aufgezeigt, dass die heutigen Verfahren zur Evaluierung von Ladungssicherung keine umfassende und reproduzierbare Untersuchung anhand nachvollziehbarer Kriterien und Lastfällen gewährleisten und somit auch keine umfassende Optimierung von Ladungssicherungsmaßnahmen ermöglichen. Demnach besteht die Notwendigkeit nach einem neuen Verfahren.

Für die Entwicklung eines solchen Verfahrens werden grundsätzliche Anforderungen und Bewertungskriterien an eine betriebs- und beförderungssichere Ladungssicherung mittels einer Fehlerbaumanalyse abgeleitet. Unter Zuhilfenahme von vereinfachten analytischen Berechnungen werden mögliche Einflussgrößen identifiziert und die Anforderungen beispielhaft quantifiziert.

Mithilfe von Literaturangaben, exemplarischen Messergebnissen sowie durch fahrdynamische Simulation werden die beim Straßentransport auftretenden Transportbelastungen identifiziert. Aufbauend auf den quantifizierten Anforderungen an Ladungssicherungssysteme werden die wesentlichen, repräsentativen Belastungsparameter abgeleitet, die eine Bewertung von Ladungssicherungssystemen ermöglichen und in dem zu entwickelnden Prüfverfahren darzustellen sind. Hervorzuheben ist hierbei die Notwendigkeit einer gleichzeitigen Darstellung von vertikalen und horizontalen Transportbelastungen. Des Weiteren sind die im realen Verkehrsgeschehen auftretenden Charakteristika – Richtung,

Amplitudenhöhe, Dauer, Schwellzeit, Anzahl der Nulldurchgänge der jeweiligen Beschleunigung sowie die Häufigkeit der Belastung und die allgemeine Vorgeschichte der Ladegüter bei der Evaluation mit einzubeziehen.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird die praktische Umsetzung des Prüf- und Bewertungsverfahrens aufgezeigt. Die Kombination aus einem speziellen Führungssystem und einer vertikalen Anregung erweitert den Bewegungsraum eines horizontal verfahrenen Beschleunigungsschlittens um die anderen Bewegungsfreiheitsgrade, insbesondere um den vertikalen. Dieses hydraulische Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK) vereint somit die Untersuchungsmöglichkeiten eines Beschleunigungsschlittens mit denen eines mehrachsigen Vibrationstisches. Durch die Integration von Messsystemen zur Erfassung der Bewegung der Ladung sowie zur Detektion der Kraftabstützung zwischen Ladung und Sicherungsmitteln entsteht ein vollwertiges Testwerkzeug für die Prüfung und Bewertung von Ladungssicherungssystemen.

Versuche mit einer nicht gesicherten Ladung sowie mit einer durch formschlüssige Elemente gesicherten Ladung zeigen auf, dass das entwickelte Konzept für die Evaluation von Ladungssicherungssystemen geeignet ist. Im Speziellen verdeutlichen sie den hoch signifikanten Einfluss der vertikalen Vibrationen auf das Verhalten der Ladung bzw. auf die notwendigen Sicherungskräfte.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Güterverkehr und die Logistikbranche bilden durch den Transport von den von Menschen benötigten Gütern eine wesentliche Grundlage für den in der westlichen Welt erreichten Wohlstand. In der wirtschaftlichen Bedeutung wird die Logistikwirtschaft in der Europäischen Union (EU) lediglich durch die Bau- und Ernährungswirtschaft übertroffen.¹ Deutschland – begünstigt durch die zentrale Lage - stellt mit Abstand den wichtigsten Logistikmarkt in der EU dar². Von 1991 bis zum Jahr 2014 ist die Beförderungsmenge in Deutschland um 18,1 % auf 4,48 Mrd. Tonnen gestiegen. Die Beförderungsleistung ist im gleichen Zeitraum - durch den wachsenden individuellen Transportbedarf - sogar um 65 % auf 658 Mrd. tkm gestiegen³. Somit werden „immer mehr Waren [...] über immer größere Distanzen transportiert“⁴. Mit 468 Mrd. tkm wird mit Abstand der größte Teil durch Straßentransporte erbracht³. Diese Transportleistung wird täglich durch mehr als eine Million Lkw auf deutschen Straßen erfahren⁵.

Dieses stetig steigende Transportaufkommen steht zunehmend im Konflikt mit den Anforderungen der Ressourceneffizienz sowie des Umwelt- und Klimaschutzes⁶. Dies setzt die beteiligten Unternehmen unter Kosten-, Termin- und Leistungsdruck. Um darunter zu bestehen, ist unter anderem ein kosteneffizienter Transport erforderlich. Hierfür ist ein schadensfreier Transport und somit eine ausreichende Ladungssicherung unabdingbar: Mit Hilfe der Ladungssicherung sollen teure Warenschäden und indirekte Folgeschäden durch Unfälle vermieden werden⁷. Nach der deutschen Versicherungswirtschaft geschieht dies allerdings nur teilweise, denn Schätzungen zur Folge sind bis zu 70 % aller Güter

¹ Vgl. BMVBS: Masterplan Güterverkehr und Logistik, 2008 S. 8

² Vgl. BMVI: Logistikstandort Deutschland

³ Vgl. Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2015, 2015, S. 589

⁴ acatech: Menschen und Güter bewegen- Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand, 2012, S. 13

⁵ Vgl. BUND: Wahnsinn Güterverkehr, 2006

⁶ Vgl. acatech: Menschen und Güter bewegen- Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand, 2012, S. 9

⁷ Vgl. Assmann, D.: LaSiMatik, Dortmund, 2014, S. 1 f

auf Lkw nur mangelhaft oder gar nicht gesichert. Hierdurch entstehen jährlich Schäden von bis zu 500 Millionen Euro⁸. Auch der Sicherheitsaspekt im Straßenverkehr ist nicht zu vernachlässigen: Das statistische Bundesamt gibt unzureichende Ladungssicherung als Ursache für Unfälle mit Güterkraftfahrzeugen und Personenschäden mit 0,7 %⁹ an, glaubhaften Schätzungen zufolge liegt die Dunkelziffer jedoch weitaus höher, bei bis zu 25%¹⁰. Demnach ist die Ladungssicherung nicht nur von wirtschaftlicher Bedeutung, sondern auch von sehr hoher Relevanz für die Verkehrssicherheit. Diesem Umstand wird unter anderem in der Straßenverkehrsordnung Rechnung getragen. Nach §23 StVO ist „der Fahrzeugführer [...] dafür verantwortlich, dass die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs durch die Ladung [...] nicht leidet.“¹¹ Nach §22 StVO ist „die Ladung [...] so zu verstauen und zu sichern, dass sie selbst bei Vollbremsung oder plötzlicher Ausweichbewegung nicht verrutschen, umfallen, hin- und herrollen, herabfallen oder vermeidbaren Lärm erzeugen [...] [kann]. Dabei sind die anerkannten Regeln der Technik zu beachten“¹². Als anerkannte Regeln der Technik im Bereich Ladungssicherung im Straßenverkehr in Deutschland gelten verschiedene Normen und Richtlinien. Als grundlegend sind die

- DIN EN 12195-1:2010 Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen –Sicherheit – Teil1: Berechnung von Sicherungskräften,
- DIN 12642:2006 Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen –Aufbauten an Nutzfahrzeuge - Mindestanforderungen,
- VDI 2700 Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen und
- CTU Code 2015: Verfahrensregeln der IMO/ILO/UNECE für das Packen von Güterbeförderungseinheiten (Für Container im kombinierten¹³ Verkehr)

⁸ Vgl. GDV: Da darf nichts verrutschen, 2012

⁹ Vgl. Statistisches Bundesamt: Unfälle von Güterkraftfahrzeugen 2013, 2014, S. 48

¹⁰ Vgl. Alexander Berg: Empfehlung zur Ladungssicherung, 2010.

¹¹ StVO, §23, 2013

¹² StVO, §22, 2013

¹³ Straße, Schiene, See

zu nennen, in denen rechnerische sowie auch experimentelle Prüf- und Bewertungsmethoden für Ladungssicherungsmaßnahmen angegeben sind. Die darin beschriebenen Methoden beruhen hauptsächlich auf der bisherigen praktischen Erfahrung^{14 15} und empirischen Erkenntnissen¹⁶, wobei eine Beeinflussung durch wirtschaftliche Beweggründe nicht ausgeschlossen werden kann¹⁷. Die bisherigen Methoden haben nicht den Anspruch, die Realität vollständig abzubilden, sondern vielmehr die Ladungssicherung auf einfache, universell anwendbare¹⁷, rechtssichere und physikalisch plausible Weise zu überprüfen. Erklärungen, geschweige denn Begründungen für getroffene Annahmen und/oder Vereinfachungen sind nicht zu finden¹⁸. Wie mehrere Veröffentlichungen^{18 19} belegen, führte dies in den letzten Jahren immer wieder zu Diskussionen bei den Revisionen der einzelnen Richtlinien über die Gültigkeit einzelner (Berechnungs-)Faktoren²⁰ unter den Experten. Viel schwerwiegender ist die Tatsache, dass mit der fehlenden Begründung von Annahmen und Vereinfachungen auch das tatsächlich vorhandene Sicherheitsniveau der Ladungssicherung verborgen bleibt und im günstigsten Fall lediglich eine Überdimensionierung der Sicherungsmaßnahmen stattfindet. Ebenso kritisch anzusehen ist die nicht vorhandene universelle Anwendbarkeit der aktuell verwendeten Methoden aufgrund der Vielfalt an Ladegütern und Sicherungshilfsmitteln sowie deren Kombinationsmöglichkeit. Ferner ist das Fortschrittsdefizit der Ladungssicherung zu bemängeln: Bei der Bewertung und Prüfung von Ladungssicherung²¹ sowie größtenteils bei den angewandten Sicherungsmitteln selbst, wird auf über 25 Jahre alte Methoden zurückgegriffen. Mit den oben genannten Defiziten der bekannten Methoden ist zu bezweifeln, ob eine ökonomische und sicherheitstechnische Optimierung von Ladungssicherung mit ihnen möglich ist. Gegenstand dieser Dissertation ist daher die wissenschaftliche Analyse von Ladungssicherung im Straßenverkehr und die Entwicklung einer entsprechenden generischen Prüf- und Bewertungsmethodik.

¹⁴ Vgl. DIN EN 12195-1, 2011 Einleitung

¹⁵ Vgl. Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr - Fakten, 2013, S. 2

¹⁶ Vgl. Gillespie, T.: Engineering Analysis of Cargo Restraint on commercial highway trucks, 1987, S. 1

¹⁷ Vgl. Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr - Fakten, 2013, S. 2

¹⁸ Vgl. Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr - Wer kennt die Wahrheit, 2011, S. 1 f

¹⁹ Vgl. Nordström R. et al: Verification level of basic parameters, 2004

²⁰ z.B.: Reibbeiwert dynamisch oder statisch; Kippbeiwert; Sicherheitsbeiwerte; Berücksichtigung des einseitigen Vorspannkraftverlustes im Zurrgerät durch die Gurtreibung an den Kanten

²¹ Resultiert aus dem Vergleich der VDI 2702 Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen von 1990 und der aktuellsten Ausgabe VDI 2700 Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen von 2014

1.2 Grundlagen Ladungssicherung

1.2.1 Vorschriften zur Ladungssicherung²²

In unterschiedlichen Rechtsgebieten sind explizit bzw. implizit Vorschriften zur Ladungssicherung enthalten. Demnach ergeben sich allerdings auch unterschiedliche Rechtsfolgen bei Verstößen gegen diese Vorgaben (Eine tabellarische Übersicht ist im Anhang aufgeführt).

Im Privatrecht werden die Beziehungen zwischen natürlichen oder juristischen Personen untereinander geregelt. Als typische privatrechtliche Beziehung ist der Kaufvertrag zu nennen, der durch die Bestimmungen des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) geregelt ist. Der Gesetzgeber hat für die Beförderung von Waren spezielle Regeln im Handelsgesetzbuch (HGB) definiert. Das Gesetz bietet den beteiligten Parteien die Freiheit, die definierten Pflichten vertraglich selbst umzuverteilen.

Sobald unbeteiligte Personen beim Transport von Gütern im Straßenverkehr geschädigt werden, werden die Ansprüche nach dem allgemeinen Deliktrecht des BGB Haftung für eine schuldhafte Pflichtverletzung oder in der Praxis häufiger dem Straßenverkehrsgesetz (StVG) – verschuldensunabhängige Haftung geregelt. Mögliche Rechtsfolgen bei Nichtbeachtung sind Schadensersatzansprüche und Schmerzensgeld.

Um alle Personen und die Umwelt im öffentlichen Verkehrsbereich zu schützen, beinhaltet auch das öffentliche Recht Regelungen zur Ladungssicherung: Im Straßenverkehrsrecht (StVO), im Straßenverkehrszulassungsrecht (StVZO) sowie im Gefahrgutrecht (GGVSEB) sind solche allgemeinen Forderungen formuliert, die bei Nichtbeachtung mit Bußgeldern, Fahrverboten und Eintragungen im Verkehrszentralregister geahndet werden. Um auch den innerbetrieblichen Transport und Verkehr abzudecken und die an der Be- und Entladephase beteiligten Personen zu schützen, wurden des Weiteren die Unfallverhütungsvorschriften Fahrzeug (BGV D29) eingeführt. Die Nichteinhaltung dieser Vor-

²² Vgl. Schneider J. et al: Das 1x1 der Ladungssicherung im Straßengüterverkehr, 2013, S. 6 ff

schriften kann ebenfalls mit Bußgeldern geahndet werden. Bei besonders schwerwiegenden Folgen einer nicht ausreichenden Ladungssicherung kann sogar das Strafrecht wirksam werden und Freiheitsstrafen für den Schuldigen nach sich ziehen.

1.2.2 Anforderungen an die Ladungssicherung

Der §412 HGB - „So weit sich aus den Umständen oder den Verkehrssitten nicht etwas anderes ergibt, hat der Absender das Gut beförderungssicher zu verladen, zu stauen und zu befestigen (verladen) sowie zu entladen. Der Frachtführer hat für die betriebssichere Verladung zu sorgen“²³ - fasst unter Außerachtlassung der Verantwortlichkeiten die allgemeinen Anforderungen an die Ladungssicherung zusammen, nämlich eine beförderungs- und eine betriebssichere Verladung/Transport zu gewährleisten.

- **Beförderungssichere Verladung:** „Verladung, bei der die Ladung weder durch Einflüsse des Transports noch durch Einflüsse aufgrund der Be- und Entladung Schaden nimmt (Schutz gegen Beschädigung der Ladung)“²⁴
- **Betriebssichere Verladung:** „Verladung, bei der die Verstauung oder Befestigung der Ladung auf dem Trägerfahrzeug so erfolgt, dass weder die Verkehrssicherheit nach StVO noch die Arbeitssicherheit bei Be- und Entladung nach den Unfallverhütungsvorschriften beeinträchtigt ist (Schutz gegen ungewollte Bewegungen der Ladung)“²⁴

1.2.3 Bestandteile der Ladungssicherung

Eine ausreichende Ladungssicherung besteht im Allgemeinen aus den folgenden Komponenten²⁵, die sich jeweils gegenseitig beeinflussen:

- Ladung/Ladegut
- Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung
- Geeignetes Fahrzeug
- Verantwortliche/durchführende Personen

²³ HGB §412, 2016

²⁴ VDI 2700 Blatt 5, 2011, S. 4

²⁵ Vgl. VDI 2700 Blatt 5, 2011, S. 6

1.2.3.1 Ladung/Ladegut

Die Eigenschaften der Ladung stehen im direkten Zusammenhang mit der zu wählenden Sicherungsmethode.

- Maße und Masse
 - Art der Güter, Anzahl, Abmessungen, Masse
- Schwerpunktlage
- Festigkeit und Empfindlichkeit
 - Das Ladegut muss die beim Transport auftretenden Trägheitskräfte sowie die durch die Sicherungsmethode hervorgerufenen Kräfte unbeschadet aufnehmen. Wenn dies nicht durch das zu transportierende Gut gewährleistet ist, müssen spezielle Vorkehrungen (Ladeeinheitensicherung) getroffen werden, um wirksam ein Auseinanderfallen oder Verrutschen, Verrollen, Umkippen, Bruch, Deformation und Ausfächern der einzelnen Güter auf einer bzw. einer gesamten Ladeeinheit²⁶ zu verhindern²⁷.
- Zurrpunkte

1.2.3.2 Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung^{28,29}

Im Fahrzeug integrierte Vorrichtungen, an denen Zurrmittel und andere Hilfsmittel zur Ladungssicherung bzw. mit denen die Ladung direkt fixiert werden kann, werden nach VDI 2700 Blatt 3.2 Einrichtungen zur Ladungssicherung genannt. Dazu zählen unter anderem:

- Zurrpunkte und variable Zurrpunktsysteme
- Lochschienen
- Coilmulden
- Einsteckungen
- Zahnleisten

²⁶ „Eine Ladeeinheit ist ein aus einem einzelnen oder mehreren Gütern bestehendes Packgut, das als Ganzes während des Durchlaufens der Transportkette bzw. in der Warendistribution transportiert, umgeschlagen und/oder gelagert wird“ [VDI 3968 Blatt1, 2009, S. 5]

²⁷ Vgl. VDI 3968 Blatt 1, 2009, S. 5

²⁸ Vgl. VDI 2700 Blatt 3.2, 2006 S. 3 ff

²⁹ Nach DIN EN 12195-2:2000 werden Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung zu Ladungssicherungseinrichtungen zusammengefasst

Hilfsmittel zur Ladungssicherung werden nach VDI Vorrichtungen genannt, durch die die Ladung auf der Ladefläche gesichert werden kann oder mit denen Ladelücken³⁰ zwischen einzelnen Ladegütern ausgestaut werden können. Dazu gehören:

- Zurrmittel (Zurrgurte, -ketten, -drahtseile)
- Festlegende Hilfsmittel:
 - Zubehör für Loch und Ankerschienen (z.B. Sperrbalken)
 - Trennwände, Trenngitter, Trennnetze
 - Systemunabhängiges Zubehör (z.B. Klemmstangen, Zwischenwandverschlüsse, Transportgestelle)
 - Festlegehölzer, Holzkeile, Holzkonstruktionen
- Ausfüllende Hilfsmittel:
 - Leerpalletten
 - Luftsäcke
 - Hartschaumpolster
- Netze und Planen
- Rutschhemmende Materialien (RHM)
- Sonstige Hilfsmittel (z.B. Kantenschützer)

1.2.3.3 Geeignetes Fahrzeug

Durch die Vorgänge Beladen, Stauen und Entladen und den Transport selbst werden die (Transport-)Fahrzeuge in den Transportprozess miteingebunden. Die Fahrzeugeigenschaften beeinflussen demnach maßgeblich die Qualität und Effektivität von Laden, Stauen und Sichern³¹. Nach dem anerkannten Stand der Technik relevante Fahrzeugeigenschaften für die Ladungssicherung gelten³²:

- Fahrzeug- und Aufbauart
- Lastverteilungsplan (Nutzlast, zulässige Achslasten, Mindestachslast der Achsen)
- Abmessungen des Laderaums
- Tragfähigkeit der Ladefläche
- Zurrpunkte (Anzahl, Festigkeit)
- Belastbarkeit von Laderaumbegrenzungen

³⁰ Als Ladelücke wird der Abstand zwischen einer Ladeeinheit und einem formschlüssigen Sicherungsmittel bzw. zwischen mehreren Ladeeinheiten bezeichnet

³¹ Vgl. Großmann G. et al: Transportsichere Verpackung und Ladungssicherung, 2005, S. 140

³² Vgl. VDI 2700 Blatt 5, 2011. S. 8

1.2.3.4 Verantwortliche/durchführende Personen

Die für die Ladungssicherung verantwortlichen Personen bzw. die Personen, die die Ladungssicherungsmaßnahmen anbringen, müssen hierfür körperlich und geistig in der Lage sein sowie im Bereich Ladungssicherung entsprechend geschult (min. alle 3 Jahre) sein³³.

1.2.4 Grundlegende Arten der Ladungssicherung

Die Ladungssicherung kann auf unterschiedlichste Weise ausgeführt werden. Um eine ungewollte Bewegung der Ladung zu verhindern, müssen die hierfür verantwortlichen Massenträgheitskräfte kompensiert werden. Generell wird unterschieden in formschlüssige und kraftschlüssige Verfahren.

1.2.4.1 Formschlüssige Ladungssicherung

Das Abstützen der Ladung gegen einen geeigneten Fahrzeugaufbau mit oder ohne Distanzstücke sowie das Festlegen der Ladung durch entsprechende Hilfsmittel (z.B. Keile) wird als formschlüssige Ladungssicherung bezeichnet. Des Weiteren zählen Direktzurrverfahren (Schrägzurren, Diagonalzurren, Umreifungszurren, Kopfschlingenzurren), bei denen die Trägheitskräfte direkt durch die an der Ladung befestigten Zurrmittel kompensiert werden, zu den formschlüssigen Verfahren.

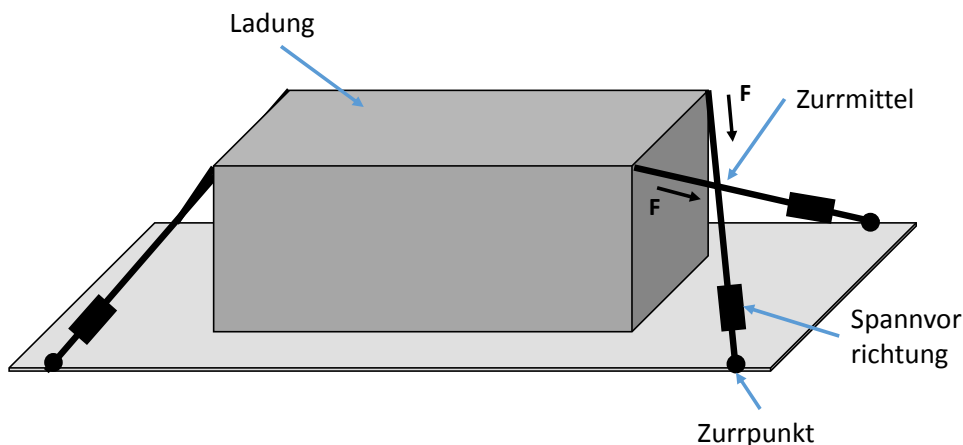


Abbildung 1: Direktzurren

³³ Vgl. VDI 2700 Blatt 5, 2011 S. 9

1.2.4.2 Kraftschlüssige Ladungssicherung

Bei den kraftschlüssigen Verfahren wird die Ladung durch die Vorspannung eines oder mehrerer Zurrmittel auf die Ladefläche gepresst und somit die den Trägheitskräften entgegen gesetzte Reibkraft erhöht. Um diesen Effekt noch weiter zu erhöhen, werden rutschhemmende Materialien verwendet.

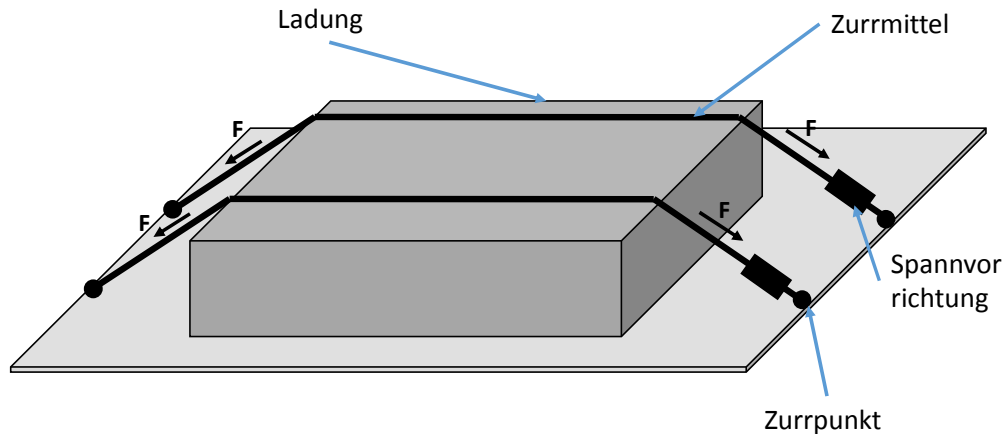


Abbildung 2: Niederzurren

1.3 Eingrenzung der Thematik

Wie dem Kapitel 1.2 zu entnehmen ist, umfasst das Thema Ladungssicherung sehr viele Bereiche vom Produkt bis hin zum Transportfahrzeug und stellt demnach ein sehr umfassendes und komplexes Thema dar. Im weiteren Verlauf beschränkt sich diese Dissertation auf Ladeeinheiten ³⁴sowie die angewendeten Hilfsmittel und Einrichtungen zur Ladungssicherung, im Folgenden Ladungssicherungssystem genannt. Die Fahrzeugeigenschaften bzw. eine unzulässige Beeinflussung dieser durch die Ladung dienen zur Definition von Kriterien. Das verantwortliche bzw. durchführende Personal wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

³⁴ Die Gestaltung der Ladungssicherung wird zwar maßgeblich von der Primär- und Sekundärverpackung eines Produktes beeinflusst und muss diesbezüglich abgestimmt werden. Allerdings existieren bereits zahlreiche Forschungsergebnisse zu der Thematik der Verpackungsprüfung und -auslegung. Die für diese Arbeit relevanten Ergebnisse werden in den entsprechenden Abschnitten aufgegriffen

1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit

In einer Übersicht zum Stand der Forschung und Technik werden die grundlegenden Prüf- und Bewertungsmethoden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Charakteristika – insbesondere hinsichtlich ihrer Schwächen – analysiert. Hierauf aufbauend werden die grundlegende Ausprägung der zu entwickelnden Prüf- und Bewertungsmethodik definiert sowie konkrete Fragestellungen formuliert. Mittels einer Fehlerbaumanalyse werden in Kapitel 3 grundsätzliche Anforderungen und somit Bewertungskriterien für ein beförderungssicher und betriebssicheres Ladungssicherungssystem abgeleitet. Unter Zuhilfenahme von vereinfachten analytischen Berechnungen werden mögliche Einflussgrößen identifiziert und die Anforderungen beispielhaft quantifiziert. Mithilfe von Literaturangaben, exemplarischen Messergebnissen sowie durch fahrdynamische Simulation werden die beim Straßentransport auftretenden Transportbelastungen ermittelt. Aufbauend auf den quantifizierten Anforderungen an Ladungssicherungssysteme werden die wesentlichen, repräsentativen Belastungsparameter abgeleitet, die eine Bewertung von Ladungssicherungssystemen ermöglichen und in dem zu entwickelnden Prüfverfahren darzustellen sind. In Kapitel 5 wird eine praktische Umsetzung der Prüf- und Bewertungsmethodik in einem Testwerkzeug vorgestellt. Das Werkzeug besteht hierbei aus einer Apparatur zum Darstellen der relevanten Lastfälle sowie aus Systemen zum Erfassen der relevanten Informationen für die Bewertung der Ladungssicherungssysteme. Anhand von Beispielversuchen wird das zugrundeliegende Konzept validiert.

2 Analyse des Stands der Technik und Forschung

Die im vorliegenden Kapitel dargestellte Zusammenfassung des Standes der Forschung und Technik befasst sich mit Verfahren zur Prüfung und Bewertung von Ladungssicherungssystemen bzw. Verfahren zu deren Dimensionierung. Grundsätzlich lassen sich diese in drei Klassen kategorisieren

- Erfahrungsbasierte Verfahren
- Modellbasierte Verfahren
- Experimentelle Verfahren

Diese werden im Folgenden jeweils in einem separaten Abschnitt analysiert. Außerdem werden in einem weiteren Abschnitt die bestehenden Erkenntnisse über vertikale Vibrationen und deren Wirkung behandelt, denen in den Normen und Richtlinien der Ladungssicherung noch keine Beachtung geschenkt wird.

Aus dem Stand der Forschung und Technik werden in einem Zwischenfazit die grundlegenden Charakteristika des zu entwickelnden Evaluierungsverfahren abgeleitet und hierauf beruhend der Forschungsbedarf für diese Arbeit deduziert.

2.1 Erfahrungsbasierte Verfahren

Im Gegensatz zu erlernbarem Rationalitätswissen³⁵ wird Erfahrung bzw. Erfahrungswissen durch praktische Handlungen oder durch Analyse früherer Fehler und Erfolge gewonnen³⁶. Das auf Erfahrung basierende Vorgehen kann schnell und effizient zu guten Lösungen führen. Eine ausreichende Lösungsfindung ist allerdings nicht sichergestellt³⁷. Insbesondere wenn aus unvollständigen Erfahrungen und mangelhaftem Rationalitätswissen falsche Annahmen getroffen werden. Wie beispielsweise das bekannte und oft herangezogene Beispiel eines nicht mit den Grundlagen der Technischen Mechanik vertrauten Lkw-Fahrers, der über ein zu sicherndes Ladegut behauptet, dass es so schwer sei, dass es sich beim Transport gar nicht auf der Ladefläche bewegen könne.

³⁵ Explizites, direkt in Zahlen und/oder Worten vermittelbares Wissen

³⁶ Vgl. Schüppel, J.: Wissensmanagement: organisatorisches Lernen im Spannungsfeld von Wissens- und Lernbarrieren, 1997 nach Turki T.: Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen, 2014, S. 43 f

³⁷ Vgl. Naefe, P: Einführung in das Methodische Konstruieren, 2009, S. 18 f

Da die erfahrungsbasierten Verfahren im hohen Maße personenbezogen³⁸ und nicht erlernbar sind sowie eine hinreichende Lösungsfindung nicht garantieren, sind diese ohne weitere Analysen zur Evaluation von Ladungssicherungsmaßnahmen nicht geeignet.

2.2 Modellbasierte Verfahren

Ein Modell ist eine approximative Darstellung der Realität. Modellbasierte Verfahren zur Evaluierung bzw. Dimensionierung von Ladungssicherungssystemen verwenden demnach (mit Unsicherheiten behaftete) Vereinfachungen und Annahmen. Die Eignung des Verfahrens, belastbare Aussagen über Ladungssicherungssysteme zu treffen, hängt maßgeblich von den Modellunsicherheiten und demnach von dem angewendeten Wissensstand bei Modellerstellung ab.

Die Klassifizierung der hier vorgestellten Verfahren bzw. den zugrundeliegenden Modellen erfolgt nach Kaps³⁹ hinsichtlich der Komplexität.

2.2.1 Quasi-statisch (Konventionell)

Die quasi-statischen Verfahren beruhen auf statische Kräfte- und Momentenbilanzen fester Körper. Mit der Masse der Ladung m_{La} , der auf die Ladung wirkenden Beschleunigung a_{La} , der Reibkraft F_R zwischen Ladung und Ladefläche, der Sicherungskräfte F_{Lasi} und dem jeweiligen Hebelarm ρ_i werden diese wie folgt berechnet:

$$0 = m_{La} \cdot a_{La} - F_R - F_{Lasi} \quad (2.1)$$

$$0 = m_{La} \cdot a_{La} \cdot \rho_i - F_R \cdot \rho_i - F_{Lasi} \cdot \rho_i \quad (2.2)$$

Folglich wird die Bewegung der Ladung vernachlässigt. Die Bilanzen gelten nur für ideal starre Ladegüter. Hierdurch sind diese nicht für elastisch und/oder plastisch verformbare Ladegüter wie z.B. Großsäcke (Flexible Intermediate Bulk Container - FIBC) anwendbar. Auch die Flexibilität der Sicherungsmittel wird vernachlässigt. Insbesondere bei der Kombination unterschiedlicher Sicherungsmethoden und/oder unterschiedlicher Sicherungsmittel mit divergierenden Steifigkeiten besteht demnach die Möglichkeit einer

³⁸ Vgl. Porschen, S.: Austausch impliziten Erfahrungswissens: neue Perspektiven für das Wissensmanagement, 2008, S.72 nach Turki T.: Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen, 2014, S. 43 f

³⁹ Vgl. Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit, 2011, S. 23 f

Überlastung eines Sicherungselementes^{40a}. Teilweise wird dieser Sachverhalt durch Restriktionen bei der Anwendung vorweggenommen: So ist beispielsweise für die Sicherung durch Direktzurren nur die Verwendung zweier gleicher, symmetrisch wirkender Zurrmittel zulässig⁴¹.

Trotz dieser Einschränkungen der quasi-statischen Verfahren finden sie international breite Anwendung in diversen Normen und Richtlinien:

- Deutschland: VDI 2700⁴²
- Europa: EN 12915-1⁴³
- Australien: Load Restraint Guide⁴⁴
- China: Load restraint assemblies on Road vehicles⁴⁵
- Internationaler Container Verkehr: CTU Code⁴⁶
- etc.

Nach Kaps^{40b} stellen sie ein leicht handhabbares, universell einsetzbares Werkzeug dar, mit dem eine Auslegung von Ladungssicherungsmaßnahmen ohne erheblichen Aufwand möglich sein soll.

Der internationale Vergleich sowie der Vergleich zwischen einzelnen Ausgaben der Normen/Richtlinien zeigt Unterschiede bei den anzunehmenden Beschleunigungswerten und bei der Einführung unterschiedlicher Sicherheitsfaktoren^{47,48}. Beispiele hierfür sind der

⁴⁰ Vgl. Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit, 2011, a:S.23f, b:S.1ff

⁴¹ Vgl. VDI 2700 Blatt 2, 2014, S. 24

⁴² Vgl. VDI 2700 ff

⁴³ Vgl. DIN EN 12195-1, 2010

⁴⁴ Vgl. NTC Australia: Load Restraint Guide, 2004

⁴⁵ Vgl. General Administration of Quality Supervision China: Load restraint assemblies on road vehicles, 2014 nach ZONG, C. et al.: The Difference and Validation of Cargo Securing Rules of Transport in Major Countries, 2014

⁴⁶ Vgl. IMO\ILO\UNECE: CTU Code, 2015

⁴⁷ Vgl. ZONG, C. et al.: The Difference and Validation of Cargo Securing Rules of Transport in Major Countries, 2014

⁴⁸ Vgl. Andersson, P. et al.: Differences in Cargo Securing Regulations, 2012

k-Faktor bei einseitig gespannter Niederzurrung⁴⁹ und der Wankfaktor⁵⁰ nach VDI 2700:2002 oder der Sicherheitsbeiwert f_s nach DIN EN 12195-1:2010.

Hier liegt eine der Schwachstellen dieser Verfahren bzw. der Umsetzung in den Normen. In den meisten Fällen bleibt die Herkunft und/oder die Herleitung dieser Sicherheitsfaktoren unklar. Immer wieder führte dies bei Revisionen einzelner Normen/Richtlinien zur Diskussion zwischen den Sachverständigen im Bereich Ladungssicherung^{40b,51}.

2.2.2 Semi-dynamisch

In semi-dynamischen Verfahren findet die Ladungsbewegung sowie die Formänderung der Ladungssicherungsmittel insoweit Berücksichtigung, dass die Kraftanteile der unterschiedlich wirkenden Sicherungsmittel berechnet werden bis ein statisches Kräftegleichgewicht zwischen den Sicherungskräften und den Trägheitskräften herrscht. Weitere dynamische Effekte, wie beispielsweise die Speicherung von Bewegungsenergie bleiben unberücksichtigt. Die Rückführung auf ein statisches Kräftegleichgewicht erfordert im allgemeinen ein iteratives Vorgehen bei der Lösungsfindung. Ein selektives und direktes Lösen ist möglich, wenn vorhergesagt werden kann, welches Sicherungsmittel zuerst versagt und für diesen Fall die zugehörige Ladungsbewegung und die Lastaufnahme der anderen Sicherungsmittel berechnet wird.^{40a}

Wie die quasi-statischen beruhen die bekannten semi-dynamischen Verfahren auf starken Vereinfachungen, wie z.B. der Annahme idealer Starrkörper. Ob diese Verfahren für eine hinreichende, aber effiziente Auslegung von Ladungssicherungsmittel geeignet sind, bleibt in der Fachliteratur unbeantwortet.

2.2.3 Volldynamisch

Volldynamische Ansätze berücksichtigen im Gegensatz zu den beiden anderen Verfahren die Dynamik einer sich bewegenden Ladung. Mit Computersimulationen werden die allgemeinen Bewegungsgleichungen auch für mehrere Ladungen/Körper (Mehrkörpersimulation, MKS) gleichzeitig gelöst. Die Anwendung von MKS-Verfahren/Programmen fand

⁴⁹ Mithilfe des k-Faktors wird bei einer einseitig gespannten Niederzurrung der Vorspannungskraftverlust durch die Reibung an den umlenkenden Kanten an der gegenüberliegenden Seite berücksichtigt.

⁵⁰ Mithilfe des Wankfaktors werden Belastungsüberhöhungen durch die Wankbewegung des Aufbaus berücksichtigt

⁵¹ Vgl. Nordstöm, R. et al: Verification of level of basic parameters important for the dimensioning of cargo securing arrangements, 2004

in der Vergangenheit bei vereinzelt simulativen Untersuchungen im Bereich Ladungssicherung Anwendung. Dazu gehören Untersuchungen

- zur Wirkung von Niederzurrungen^{52,53},
- zur Wirkung von Direktzurrungen^{54,55},
- zur Wirkung von vertikalen Vibrationen auf Ladungssicherungssysteme^{52,54},
- zum Einfluss der Sicherungsart auf das Bremsverhalten von Transportfahrzeugen mit ABS⁵⁶ und
- zur Auslegung von Energieabsorbern für den Aufprall beim Unfall⁵⁷.

Um die Verformungsvorgänge von flexiblen Ladungen und/oder komplexen, Sicherungssystemen (z.B. Netze aus Kunstfaser) zu berücksichtigen, werden die MKS-Verfahren mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) erweitert^{58,59}.

Mit dem Gütegrad des MKS- und/oder des FEM-Modells steigt allerdings auch der Aufwand. Nicht nur bei der Berechnung wegen der Anzahl der notwendigen Rechenoperationen, sondern auch bei der Parametrierung und Validierung. Insbesondere für den letztgenannten Punkt der Validierung sind praktische Versuchsreihen erforderlich. Für solche Versuchsreihen besteht die Notwendigkeit einer reproduzierbaren Testfallgenerierung und einer robusten und geeigneten Datenerfassung. Vermutlich ist dies der Hauptgrund für das Fehlen einer dokumentierten Validierung der Modelle in den bisherig bekannten Arbeiten.

Da sich die Anwendung von MKS und FEM in der alltäglichen Ingenieurpraxis in verschiedenen Bereichen bewährt hat, ist davon auszugehen, dass bei Vorhandensein valider Modelle und Parameter die Methode geeignet wäre, um Ladungssicherungssysteme auszulegen. Ob der damit verbundene Aufwand durch das zu erwartende Ergebnis gerechtfertigt ist, bleibt zunächst offen.

⁵² Vgl. Romero, J. et al.: Restraint cargo dynamics in road transportation: indirect tiedowns, 2002

⁵³ Vgl. ZONG, C.: The Difference and Validation of Cargo Securing Rules of Transport in Major Countries, 2014

⁵⁴ Vgl. Romero, J. et al.: Restraint cargo dynamics in road transportation: direct tiedowns, 2004

⁵⁵ Vgl. Liberté, M.: Modélisation et simulation d'un véhicule, 2004

⁵⁶ Vgl. Romero, J. et al.: Simulation of Solid Cargo-Vehicle interaction During Braking, 2005

⁵⁷ Vgl. Kong, W.: A Method of selecting and Configuring Optimal Energy Absorbing Cargo, 2010

⁵⁸ Vgl. Viisoreanu, A. et al.: Analysis of an Aircraft Cargo Net Barrier Using MSC/Nastran, 1999

⁵⁹ Vgl. Predictive Engineering: LS-DYNA Cargo Net Simulation

2.3 Experimentelle Verfahren

Grundsätzlich ist die Ladungssicherung zur aktiven Sicherheit⁶⁰ zu zählen (vgl. Kap 1.2.2 und 3.2). Die Wirkmechanismen der Ladungssicherung Aufnahme/Umleitung von Kräften, Dissipation von Bewegungsenergie etc. sind jedoch vergleichbar mit denen der passiven Fahrzeugsicherheit⁶¹. Die Formulierung der Zielsetzung experimenteller Prüf- und Bewertungsverfahren von Ladungssicherungssystemen erfolgt daher in Anlehnung an die der experimentellen Simulation in der passiven Fahrzeugsicherheit nach Kramer⁶²:

Das Ziel der experimentellen Simulation im Bereich Ladungssicherung ist das Verhalten von Ladungssicherungssystemen oder Teilkomponenten unter möglichst realistischen Bedingungen nachzubilden. Da die unter Laborbedingungen gewonnenen Ergebnisse eine Aussage über die Wirksamkeit von Sicherungsmaßnahmen in „normalen“ Verkehrssituation⁶³ ermöglichen sollen, ist die Realität dabei die Gesamtheit des Verkehrsgeschehens beim Transportvorgang. Für die Auswahl geeigneter Verfahren sind die folgenden Randbedingungen zu beachten:

- Relevanz bezüglich des Verkehrsgeschehens
- Repräsentativität bezüglich der Mechanik
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

2.3.1 Prüfstandversuche

2.3.1.1 Quasi-statische Versuche

Statische Neigungsprüfung

Die Verifikation der Wirksamkeit von Ladungssicherungsmaßnahmen kann gemäß DIN 12195-2010⁶⁴ durch die statische Neigungsprüfung erfolgen. Hierbei wird die Ladung auf eine Lkw-Ladefläche oder einer vergleichbaren Fläche gestellt und entsprechend der zu untersuchenden Sicherungsmethode gesichert. Die Ladefläche wird langsam bis zu einem Prüfwinkel φ in Abhängigkeit des Reibwerts μ und der zu prüfende Beschleunigung a geneigt (vgl. Formel (2.3))

⁶⁰ unfallvermeidende Maßnahmen

⁶¹ Unfallfolgen mindernde Maßnahmen

⁶² Vgl. Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, 2008 S. 325 f

⁶³ Notbremsungen und Ausweichmanöver jedoch keine Verkehrsunfälle

⁶⁴ Vgl. DIN EN 12195-1, 2010, S. 42 f

$$\frac{a}{g} - \mu = \sin \varphi - \cos \varphi \cdot \mu \quad (2.3)$$



Abbildung 3: Statische Neigungsprüfung

Wenn die Ladung nicht verrutscht bzw. sich nicht unzulässig⁶⁵ verformt, gilt die Prüfung als bestanden. Der große Vorteil dieses Verfahrens besteht in dem sehr einfachen Versuchsaufbau, der auch für mobile Prüfeinrichtungen geeignet ist. Diesem Vorteil stehen mehrere Nachteile entgegen: Die statische Neigungsprüfung ist wegen der Kippgefahr auf niedrige, nicht kipppgefährdete Ladegüter beschränkt. Die Neigungsprüfung impliziert eine Unabhängigkeit zwischen der Reibung und der Flächenpressung und vernachlässigt die Verformungen am Ladeboden und dem Ladeeinheitenträger (bzw. der Ladung selbst). Ferner werden mit diesem Verfahren jegliche dynamischen Effekte vernachlässigt. So bleibt die Abhängigkeit des Verformungs-/Reibungswiderstandes von der Verformungs- bzw. Gleitgeschwindigkeit unberücksichtigt. Dies kann zu unterschiedlichen Ergebnissen der Neigungsprüfung im Vergleich zu dynamischen Schlittenversuchen (vgl. Abschnitt 2.3.1.2) führen, wie Vergleichsuntersuchungen bei ESTL (Engineering & solutions for transport an logistics) belegen⁶⁶. Weiterhin wird der Unterschied zwischen dem statischen Kräftegleichgewicht und dem Impulssatz vernachlässigt, insbesondere im Hinblick auf mögliche Ladelücken kann dies zu divergierenden Aussagen bei der Beurteilung von Ladungssicherungssystemen führen (vgl. 3.2.5).

⁶⁵ Die Bedeutung von unzulässig bleibt nach DIN 12195-1:2010 offen.

⁶⁶ Vgl. Juwet, M. et al: Testmethode zur Untersuchung der Stabilität von Ladeeinheiten, 2010

Sonstige quasi-statische Prüfverfahren

Um das Verhalten von Ladungssicherungssystemen oder von Teilkomponenten (Ladung, Ladungssicherungsmaßnahmen, Verbindungselemente zum Transportfahrzeug) zu untersuchen, wurden^{67,68,69,70} und werden^{71,72,73} weitere quasi-statische Prüfeinrichtungen eingesetzt, bei denen mit Hilfe eines Aktors (z.B. Hydraulikzylinder, Luftsack etc.) eine Prüfkraft optional über einen Hilfsrahmen gleichmäßig⁷⁴ auf das Untersuchungsobjekt aufgebracht wird, um dessen Verhalten zu untersuchen. Ebenso wie bei der statischen Neigungsprüfung werden bei diesen Prüfverfahren alle dynamischen Effekte vernachlässigt. Hinzu kommt die Tatsache, dass der Kraftangriffspunkt bzw. die Kraftverteilung über eine solche Prüfeinrichtung wegen der unterschiedlichen Flexibilität der Komponenten im Allgemeinen nicht dem realen Kraftangriffspunkt respektive der realen Kraftverteilung entspricht.

Eignung der quasi-statischen Prüfverfahren

In der Praxis resultiert weder ein Bremsmanöver noch ein anderes Fahrmanöver in einer statischen Belastung der Ladung. Vielmehr wirken die Belastungen dynamisch. Im Bereich Ladungssicherung sind allerdings im Gegensatz zur Konstruktionspraxis keine Korrekturfaktoren bekannt, durch die eine Substitution von dynamischen zu statischen Beanspruchungen möglich ist. Des Weiteren ist im Hinblick auf mögliche Ladelücken der Unterschied zwischen dynamischen und statischen Beanspruchungen nicht zu vernachlässigen, da der Impulssatz nicht dem statischen Kräftegleichgewicht entspricht⁷⁵.

Daher sind die statischen Verfahren ohne entsprechende Korrekturfaktoren nicht für die Untersuchung von Ladungssicherungssystemen geeignet.

⁶⁷ Vgl. Mercer, W. et al: Tests on methods of securement for thick metal plate, 1997, S. 2 f

⁶⁸ Vgl. Billing, J.: Effect of Cargo of Cargo Movement Tension in Tiedowns, 1998, S. 2 f

⁶⁹ Vgl. Mercer, W. et al.: Load Capacity of nailed wood blocking, 1997, S. 4 f

⁷⁰ Vgl. Neale, M. et al.: A Technical Reference on Cargo Restraint for Light Commercial Vehicles under Accident Conditions, 2008, S. 133 f

⁷¹ Vgl. DIN EN 12642, 2007, S. 10

⁷² Vgl. VDI 2700 Blatt 3.3 (Entwurf), 2011, S. 8

⁷³ Vgl. DIN EN 12195-2, 2001, S. 12

⁷⁴ soweit Prinzip bedingt möglich

⁷⁵ Vgl. Klonecki, K.: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung von Ladung, 2014

2.3.1.2 Dynamische Versuche

Schlittenversuche

Mit Schlittenversuchen werden Untersuchungen der Stabilität von Ladeeinheiten durchgeführt⁷⁶. Prinzipiell besteht hiermit auch die Möglichkeit, Ladungssicherungssysteme zu testen⁷⁷. Bei Schlittenversuchen wird die Ladung auf einen Schlitten positioniert, der definiert horizontal beschleunigt und/oder verzögert wird. Schlittenversuche werden nach der Beschleunigungsdauer τ in Aufpralltest ($10 \text{ ms} < \tau \leq 80 \text{ ms}$) und in Beschleunigungstest ($\tau > 80 \text{ ms}$) eingeteilt. Beim Aufpralltest trifft die Ladung bzw. der Schlitten mit einer definierten Geschwindigkeit auf ein Hindernis (Wand oder Dämpfelement/Puffer). Somit sind Beschleunigungen $> 15 \text{ g}$ möglich. Hierfür ist ein vergleichsweise einfacher Versuchsaufbau notwendig. Allerdings sind aufgrund der kurzen Beschleunigungsdauer nicht die gleichen Effekte wie bei einem Fahrmanöver darstellbar⁷⁸. Bei den Beschleunigungstests wird mit Hilfe von aufwendig geregelten bzw. gesteuerten Systemkomponenten (Elektromotor/-generator, Hydraulikzylinder usw.) die Beschleunigungs- und Verzögerungsdauer (in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Strecke) um ein Vielfaches im Vergleich zu den Aufpralltests angehoben⁷⁸.

Bei der Stabilitätsprüfung von Ladeeinheiten wird die maximale Verformung während des Versuchs und nach Versuchsende herangezogen. Hierfür werden in der EUMOS-Richtlinie 40509 erstmals quantitative Werte (maximale plastische (elastische) Verformung: 6 cm bzw. 5% (10%) der Höhe) angegeben⁷⁹. Wegen der fehlenden Anwendung für Ladungssicherungssysteme sind hierfür bislang keine Bewertungskriterien definiert.

Trotz Auflistung der EUMOS-Richtlinie bei den anzuwendenden Normen für die technische Unterwegs-Kontrolle in der EU⁸⁰ ist der Einsatz von Schlittenversuchen im Bereich Ladungssicherung bzw. bei der Bewertung der Ladeeinheitenstabilität umstritten: Kritisiert wird zum einen, dass die Beschleunigungsdauer sowie der –verlauf nicht den Werten entsprechen, die im Fahrversuch gewonnen werden, und zum anderen die Höhe der zulässigen Verformungen. Bemängelt wird auch, dass die Prüfung mit einer maximalen Geschwindigkeit von „lediglich“ ca. 10 km/h durchgeführt wird⁸¹. Eine Erklärung, welchen

⁷⁶ Vgl. EUMOS 40509, 2012

⁷⁷ Vgl. Juwet, M. et al.: Testmethode zur Untersuchung der Stabilität von Ladeeinheiten, 2010, S. 177

⁷⁸ Vgl. Juwet, M. et al.: Acceleration Test Machine, 2011

⁷⁹ Vgl. EUMOS 40509, 2012

⁸⁰ Vgl. Richtlinie 2014/47/EU, 2014, Anhang III

⁸¹ Vgl. Bühren, W.: Neue Richtlinie für die Lasi, 2016

Einfluss die Prüfgeschwindigkeit bei Außerachtlassen des Luftwiderstandes⁸² hat, fehlt und bleibt aus physikalischer Sicht unverständlich.

Überdies werden die Ladegüter bei heutigen Prüfeinrichtungen rein horizontal beschleunigt. Die beim Transport ebenfalls gleichzeitig auftretenden vertikalen Beschleunigungen – resultierend aus dem Überfahren von Straßenunebenheiten – werden vernachlässigt. Aus diesem Grund ist die Eignung von alleinig horizontalen Schlittenversuchen für eine umfassende wissenschaftliche Untersuchung von Ladungssicherungssystemen anzuzweifeln⁸³.

Schwingprüfung⁸⁴

Mit dem Ziel die Festigkeit sowie das Schutzvermögen eines Packstückes unter einer Schwinganregung^{85,86} oder auch die Wirkung von vertikalen Vibrationen auf Ladungssicherungssysteme^{87,88} zu untersuchen, werden Prüftische eingesetzt, die einen bis sechs Freiheitsgrade aufweisen. Die Ladung wird gemäß definierter Prüfspektren (z.B. DIN EN ISO 13355) harmonischen oder rauschförmigen Bewegungsschwingungen ausgesetzt. Aufgrund der üblicherweise verwendeten Aktorik sind nur kurze Wegamplituden möglich ($< 100 \text{ mm}^{89,90}$). Damit ist eine Darstellung der aus realen Fahrmanövern resultierenden Beschleunigungsdauern für die horizontalen Richtungen nicht ansatzweise möglich (vgl. 4.2.1).

Daher ist auch dieses Verfahren ungeeignet, das Verhalten von Ladung und Ladungssicherung vollständig zu untersuchen.

Dynamische Neigungsprüfung

Eine spezielle Variante des oben beschriebenen Prüfverfahrens, bei der zusätzlich die Erdanziehung für die Prüfung genutzt wird (vgl. 2.3.1.1 Statische Neigungsprüfung), ist z.B. mit Hexapoden möglich. Dadurch sind prinzipiell beliebig lange Beschleunigungszeiten

⁸² In der Regel findet der Transport von Waren in geschlossenen Anhängern/Aufbauten statt.

⁸³ Vgl. Klonecki, K.: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung von Ladung, 2014

⁸⁴ Vgl. Klonecki, K.: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung von Ladung, 2014

⁸⁵ Vgl. DIN EN ISO 13355, 2003

⁸⁶ Vgl. DIN EN ISO 2247, 2002

⁸⁷ Vgl. Rakheja, S. et al.: Experimental Evaluation of Friction coefficients, 1997

⁸⁸ Vgl. Flog: Untersuchung von Reibungskräften, 2007

⁸⁹ Vgl. IMV: Products

⁹⁰ Vgl. Bruelkjaer: Products

darstellbar. Durch eine Drehbewegung wirken allerdings Radial- und Transversalbeschleunigungen auf die einzelnen Teile (Packstücke) einer Ladeeinheit. Hierdurch werden bei einer zusammengesetzten Ladeeinheit die Sicherungsmittel – insbesondere die Ladeeinheitensicherung unterschiedlich belastet, selbst wenn der Momentanpol sich im Schwerpunkt der Ladung befindet. Diese wirkenden Beschleunigungen sind nicht nur abhängig von der Winkelgeschwindigkeit und der -beschleunigung, sondern auch von dem Abstand der einzelnen Packstücke zum Drehpunkt. Aufgrund der Maße von typischen Ladungen ($l = 1\text{ m}$, $b = 1\text{ m}$, $h = 2\text{ m}$) resultiert ein inhomogener Beschleunigungsverlauf auf die Ladung während der Simulation eines dynamischen Fahrmanövers. Daher ist eine Untersuchung von zusammengesetzter Ladung unter realistischen Belastungen mit diesem Verfahren nicht möglich⁹¹.

2.3.2 Fahrversuche

2.3.2.1 Fahrversuche auf einem Testfeld

Nach DIN EN 12195-1⁹² besteht die Möglichkeit, die analytische Dimensionierung von Sicherungsmaßnahmen bzw. die analytische Überprüfung dieser durch geeignete praktische Prüfungen zu ersetzen. Als geeignet gelten diejenigen Verfahren, die die grundlegenden Auslegungsparameter wiedergeben, wie die sogenannte dynamische Fahrprüfung. Hierzu werden die in der Norm zur Überprüfung der Lkw-Aufbaufestigkeit (DIN EN 12642⁹³) beschriebenen Fahrversuche verwendet. Nach Berg⁹⁴ basieren diese Fahrversuche auf Worst-Case-Szenarien der Fahrpraxis und ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung von Fahrzeug, Ladung und Ladungssicherung.

Um ein Ladungssicherungssystem zu zertifizieren, wird dieses auf bzw. in einem Lkw aufgebaut und folgende Fahrmanöver jeweils dreimal durchgeführt⁹³:

- Bremsmanöver aus 35-40 km/h mit einer Verzögerung von $7,85\text{ m/s}^2$ (0,8 g)
- Rückwärtiges Bremsmanöver aus der maximalen Rückfahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs mit einer Verzögerung von $4,91\text{ m/s}^2$ (0,5 g)
- Durchfahrt einer 180° Kreisbahn/Kurve (Radius 25 m) mit einer Geschwindigkeit von mindestens 30 km/h und einer Beschleunigung von $4,91\text{ m/s}^2$ (0,5 g)

⁹¹ Vgl. Klonecki, K.: Konzeption und Entwicklung eines stationären Prüfstandes, 2013

⁹² Vgl. DIN EN 12195-1:2010 S. 29

⁹³ Vgl. DIN EN 12642:2006

⁹⁴ Vgl. Berg, A. et al.: Investigation of cargo safety, 2002, S. 9 ff

- Durchfahrt zweier gegenläufiger Kreisbahnen/Kurven (Radius jeweils 25 m) mit einer Geschwindigkeit von mindestens 30 km/h und einer Beschleunigung von jeweils $\pm 4,91 \text{ m/s}^2$ ($\pm 0,5 \text{ g}$) mit anschließender Bremsung mit einer Verzögerung von $5,89 \text{ m/s}^2$ ($\pm 0,6 \text{ g}$)

Sofern die Ladung nach Erreichen der vorgeschriebenen Beschleunigungswerte (an den in der Norm definierten Positionen⁹⁵) und -dauern keine unzulässige Verschiebung und Verformung aufweist und weder die Sicherungsmaßnahmen noch der Lkw-Aufbau beschädigt oder unzulässig verformt sind⁹⁶, wird die gewählte Sicherungsmaßnahme als geeignet für das geprüfte Ladegut eingestuft.

Da die Fahrversuche mit realen Fahrzeugen durchgeführt werden, wird angenommen, dass sie eine ausreichende Approximation an den Anwenderbetrieb darstellen.⁹⁴

Die Evaluierung der Ladungssicherungssysteme im Fahrversuch erfolgt nicht fahrzeug- und ausladungsunspezifisch. D.h. ein Ladungssicherungssystem ist allgemein für jeglichen Straßentransport geeignet⁹⁷, sobald die Fahrversuche nach DIN 12642 mit einem Fahrzeug und einer Ausladungsvariante bestanden wurden.

Um die Eignung der DIN 12642 für die Evaluation von Ladungssicherungssystemen zu untersuchen, wird im Folgenden analysiert, welchen Einfluss die nicht definierten Parameter:

- die Position der Ladung,
- die Fahrzeugparameter:
 - Beladungszustand,
 - Kippgrenze,
 - Wahl des Transportfahrzeugs
- sowie das Fahrerverhalten

auf die Belastung der Ladung nehmen.

Dies erfolgt unter anderem anhand von Simulationen. Hierfür wird die kommerziell vertriebene Fahrdynamiksimulationssoftware IPG Truckmaker verwendet, die auch bei der Homologation von Bremssystemen für den Lkw-Anhänger Anwendung findet⁹⁸. Für die Fahrmanöver wird auf das in der Software integrierte Fahrermodell „Driver“ zurückgegriffen. In Vergleichsuntersuchungen der IPG Automotive GmbH und der Haldex Brake

⁹⁵ Je nach Ausgabe der DIN EN 12642 sind jeweils zwei unterschiedliche Konfigurationen möglich.

⁹⁶ Die DIN EN 12642:2006 spezifiziert keine zulässigen Verschiebungen der Ladung. Die zulässige elastische (plastische) Verformung des Aufbaus beträgt maximal 300mm (20 mm).

⁹⁷ Lediglich die Aufbaufestigkeit (Code L oder Code XL) wird spezifiziert

⁹⁸ Vgl. Wurster, U. et al.: Simulationsbasierte Homologation von Bremsen für Lkw-Anhänger, 2010

Products AB hat sich die Validität dieses Fahrermodells für die Darstellung eines menschlichen Testfahrers in fahrdynamischen Grenzsituationen bewährt. Statt ein spezifisches Fahrzeugmodell zu parametrieren wird auf die im Truckmaker vordefinierten Fahrzeugmodelle zurückgegriffen, die die grundlegenden Charakteristika der jeweiligen Fahrzeugklasse widerspiegeln⁹⁹.

Beeinflussung durch Positionierung der Ladegüter

Die dynamischen Transportbelastungen auf das Ladegut resultieren aus der Bewegung bzw. aus der Bewegungsänderung des Transportfahrzeugs. Die Absolutbeschleunigung der Ladung \vec{a}_{La} ergibt sich aus der Führungsbeschleunigung (Beschleunigungsanteil, den ein Beobachter auf dem Fahrzeug wahrnimmt), der Coriolisbeschleunigung und der Relativbeschleunigung zwischen Ladegut und Fahrzeug \vec{a}_{rel} zu

$$\vec{a}_{La} = \vec{a}_{fzg} + \vec{\omega} \times \vec{\rho} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}) + 2\vec{\omega} \times \vec{v}_{rel} + \vec{a}_{rel}. \quad (2.4)$$

Mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ (bestehend aus der Wankrate $\dot{\phi}$, der Nickrate $\dot{\theta}$ und der Kursrate, ausgedrückt durch die Summe der Gierrate $\dot{\psi}$ und der Schwimmwinkelgeschwindigkeit $\dot{\beta}$) des Fahrzeugs

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} + \dot{\beta} \end{pmatrix},$$

dem Abstand $\vec{\rho}$ vom Fahrzeugschwerpunkt (Referenzpunkt im bewegten Relativsystem) und der Relativgeschwindigkeit des Ladegutes zum Fahrzeug \vec{v}_{rel} .

Zu berücksichtigen ist dabei die aufgrund des Wankwinkels anteilig wirkende Erdbeschleunigung in lateraler Richtung sowie die damit verbundene Reduktion der Normalkraft der Ladung auf die Ladefläche (Reduktion der Reibkraft).

Bei Vernachlässigung einer möglichen Bewegung der Ladung sind in Abbildung 4 die auf die Ladung wirkende laterale Beschleunigungen an drei verschiedenen Positionen¹⁰⁰ (Stirnwand (kurveninnen), Fahrzeugschwerpunkt, Heck (kurvenaußen)) auf einem üblichen 26 t Lkw (z.B. Daimler Atego) bei dem Fahrmanöver 180°-Kurve sowie die auf den Fahrzeugschwerpunkt bezogenen Beschleunigungsunterschiede dargestellt.

⁹⁹ Fahrzeugparameter sind im Anhang aufgeführt.

¹⁰⁰ Der Zeitverzug zwischen den einzelnen Messstellen wurde entfernt, 2010

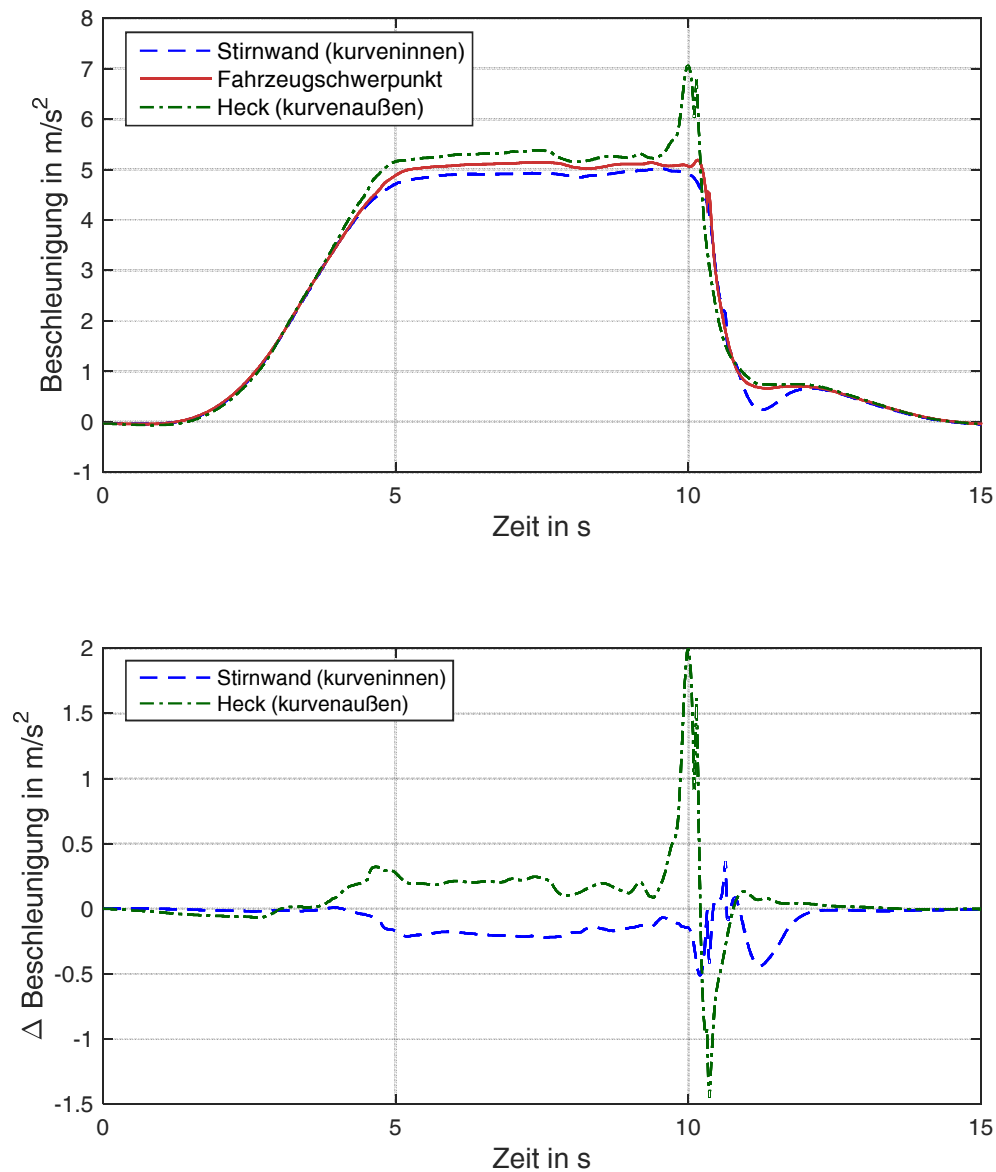


Abbildung 4: Auf die Ladung wirkende Beschleunigung (Stirnwand (kurveninnen), Fahrzeugschwerpunkt und Heck (kurvenaußen)) auf einem 26 t Lkw (z.B. Daimler Atego) bei einer 180° Kurvenfahrt nach DIN EN 12642 (oben); Unterschied der Beschleunigungsverläufe (Stirnwand (kurveninnen), Heck (kurvenaußen)) zum Beschleunigungsverlauf des Fahrzeugschwerpunktes

Bei der Kurvenausfahrt ($t = 10$ s) beträgt der maximale Beschleunigungsunterschied über 2 m/s^2 zwischen den einzelnen Positionen. Daraus resultiert eine höhere Belastung des Ladungssicherungssystems auf der kurvenäußeren Seite im Heckbereich als auf der kurveninneren Seite an der Stirnwand bei der Durchfahrt einer Kurve.

Beeinflussung durch Fahrzeugparameter

Das Fahrverhalten von Fahrzeugen ist von der Gesamtheit der beeinflussenden Parameter abhängig. Das stationäre Fahrverhalten ist unter anderem von den Reifeneigenschaften, von der Beladung und der Achslastverteilung, von den Federsteifigkeiten im Fahrwerk sowie von der Kinematik der Radaufhängung abhängig. Bei dynamischen Fahrmanövern kommen die Dämpfungseigenschaften, die Fahrzeugträgheitsmomente und weitere dynamische Eigenschaften (Bereifung, Lenksystem, Radaufhängung etc.) hinzu. Ferner beeinflussen die Bremskraftverteilung sowie die ABS- und ESC-Auslegung das Fahrverhalten. Im Bereich der Nutzfahrzeuge ist zudem zwischen Solofahrzeugen und Zugkombinationen (z.B. Sattel- oder Gliederzug) zu unterscheiden.¹⁰¹

Abhängigkeit der vertikalen Transportbelastungen vom Beladungszustand

Nach Messungen von Ibrahim¹⁰² erhöht sich die Belastung der Ladung durch vertikale Vibrationen¹⁰³ signifikant (106 % RMS der vertikalen Vibrationen) bei unbeladenem¹⁰⁴ Fahrzeug im Vergleich zu einem vollbeladenen Fahrzeug mit herkömmlicher Blattfederung. Grund hierfür ist die Änderung der Eigenfrequenzen.

Beeinflussungsmöglichkeiten der lateralen Transportbelastung:

Aufgrund der hohen Schwerpunkthöhe im Verhältnis zur Spurweite, wird bei beladenen Nfz die Kippgrenze vor der Kraftschlussgrenze der Reifen erreicht. Demnach ist durch die Kippgrenze des Transportfahrzeugs die maximale laterale Transportbelastung in normalen Verkehrssituationen vorbestimmt. Die Kippgrenze ist in erster Linie durch die Höhe des Schwerpunkts und durch die Spurweite definiert. Weitere Einflussgrößen sind unter anderem die Wankfedersteifigkeit, die Verteilung dieser zwischen den Achsen, die Höhe des Wankzentrums, die vertikale und laterale Federsteifigkeit der Reifen, die Rahmensteifigkeit¹⁰⁵. Nach DIN 12642 sind während der Kurvenfahrt und dem Ausweichmanöver $4,91 \text{ m/s}^2$ zu erreichen. Für die meisten beladenen Nutzfahrzeuge überschreitet der geforderte Beschleunigungswert die fahrdynamischen Möglichkeiten, so liegt beispielsweise die Kippgrenze von beladenen Sattelkraftfahrzeugen und von schweren Lkw

¹⁰¹ Vgl. Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 2011, S. 350 ff

¹⁰² Vgl. Ibrahim, I. et al.: The Impact of the Dynamic Tractor-Semitraile Interaction on the Ride Behaviour of Fully-Laden and Unladen Trucks, 2004

¹⁰³ Die vertikale Anregung der Ladung ist in der DIN 12642 nicht spezifiziert. Lediglich beim Bremsmanöver wird eine Anregung des Fahrzeugs durch Überfahrt einer Fahrbahnschwelle gefordert.

¹⁰⁴ Gilt als Grenzfall für nahezu unbeladen. Insbesondere im Verteilerverkehr ist dieser Beladungszustand am Ende einer Fahrroute anzutreffen.

¹⁰⁵ Vgl. Dahlberg, E.: Commercial Vehicle Stability, 2001, S. 5 ff

bei unter 4 m/s^2 ¹⁰⁶. Um dennoch die geforderten Werte zu erreichen, ist der Einsatz einer seitlichen Stützachse zulässig. Bei leichten Lkw¹⁰⁶, bei unbeladenen¹⁰⁷ Fahrzeugen bzw. bei Fahrzeugen mit sehr niedrigem Schwerpunkt (vgl. Definition Kippgrenze in Abschnitt 3.2.2.2) besteht die Möglichkeit, auch höhere Beschleunigungswerte zu erreichen.

Variation der Transportbelastungen durch die Wahl des Transportfahrzeugs:

In Abbildung 5 sind die simulierten lateralen Beschleunigungsverläufe des Fahrzeugschwerpunktes bei einem nach DIN 12642 definierten, mit 37 km/h ¹⁰⁸ gefahrenem Ausweichmanöver (S-Kurve) von verschiedenen exemplarischen Fahrzeugen (Sattelzug, 26 t Lkw, 7,5 t Lkw, Gliederzug: 7,5 t Lkw + Anhänger) dargestellt. Die Abbildung zeigt für die verschiedenen Fahrzeuge unterschiedliche Beschleunigungsverläufe. Die gefahrenen Manöver von Sattelzug und Gliederzug erfüllen nicht die Anforderungen der Norm. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit oder eine Variation der Lenkstrategie ist möglich, um die Werte zu erreichen; aus Vergleichsgründen wird darauf allerdings verzichtet. Im ersten Teil des Manövers (positive Beschleunigungsamplitude) beträgt der maximale Beschleunigungsunterschied $0,84 \text{ m/s}^2$, im zweiten Teil $1,73 \text{ m/s}^2$.

¹⁰⁶ Vgl. Mitschke M. et al.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 2003, S. 558

¹⁰⁷ Gilt als Grenzfall für nahezu unbeladen. Insbesondere im Verteilerverkehr ist dieser Beladungszustand am Ende einer Fahrroute anzutreffen

¹⁰⁸ 37 km/h ist die maximale Geschwindigkeit für den in der Simulation verwendeten und beladenen 26 t Lkw dar

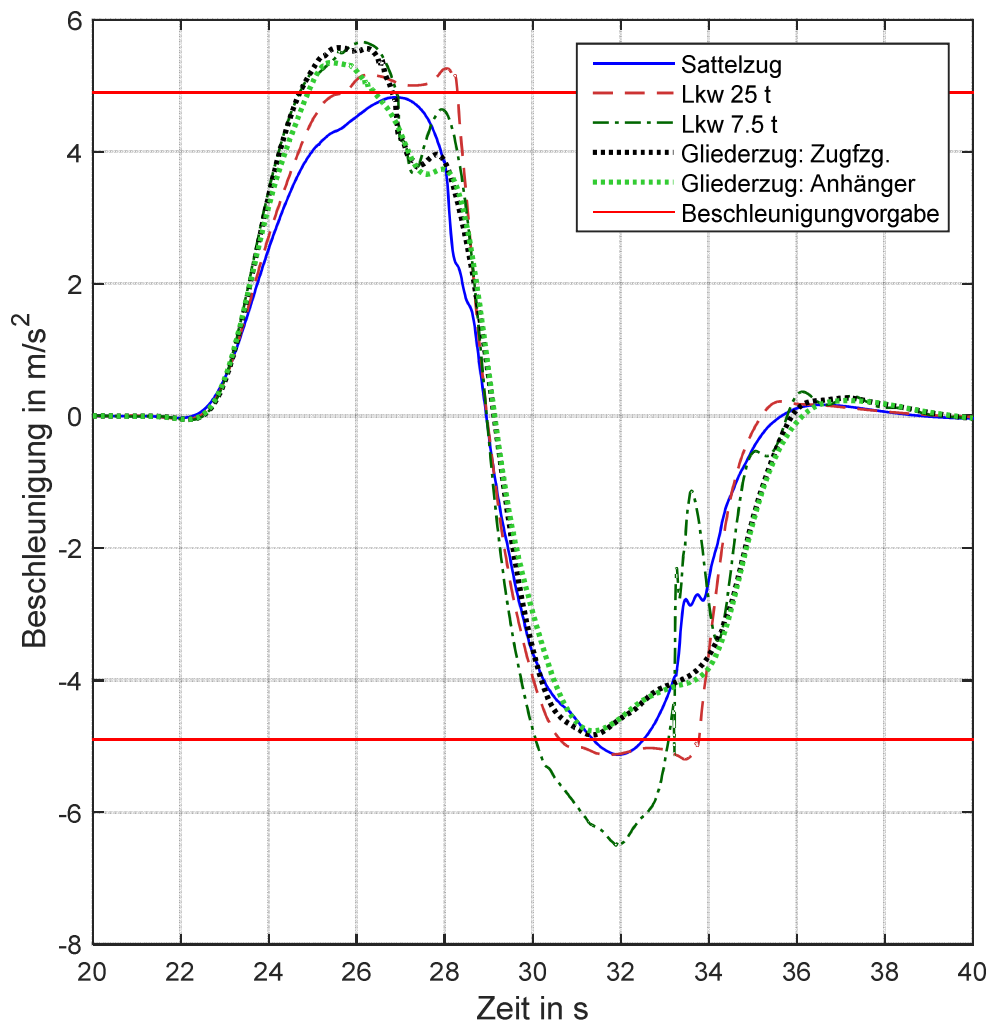


Abbildung 5: Laterale Beschleunigungsverläufe des Fahrzeugschwerpunktes bei einem Ausweichmanöver (37 km/h) nach DIN 12642 von verschiedenen exemplarischen Fahrzeugen

Beeinflussung durch den Fahrer

Die Zertifizierung von Ladungssicherungssystemen nach DIN 12642 wird als Closed-Loop-Manöver durchgeführt. Bei Closed-Loop-Manövern wird ein bestimmter Kurs vorgegeben, der von dem jeweiligen Fahrer (Regler) abgefahren wird. Die individuelle Lenkstrategie verschiedener Fahrer hat Einfluss auf die Messergebnisse¹⁰⁹: In Abbildung 6 sind die simulierten Beschleunigungsverläufe am Heck eines 7,5 t Lkw bei einem Ausweichmanöver (S-Kurve) mit drei verschiedenen Lenkstrategien dargestellt. Die Simulation erfolgte mit 0, 50 und 100 % Ausnutzung der verbleibenden Fahrbahnbreite („Kurvenschneiden“). Unterschiede ergeben sich in der Amplitudenhöhe (maximaler

¹⁰⁹ Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 2011, S.348

Unterschied beträgt $0,73 \text{ m/s}^2$ im ersten Teil des Manövers bzw. $0,60 \text{ m/s}^2$ im zweiten Teil) sowie im Gradienten der Beschleunigung. Beispielsweise beträgt der maximale Unterschied im ersten Anstieg (zwischen $t = 22 \text{ s}$ und $t = 25 \text{ s}$) bis zu $1,67 \text{ m/s}^2$ ¹¹⁰.

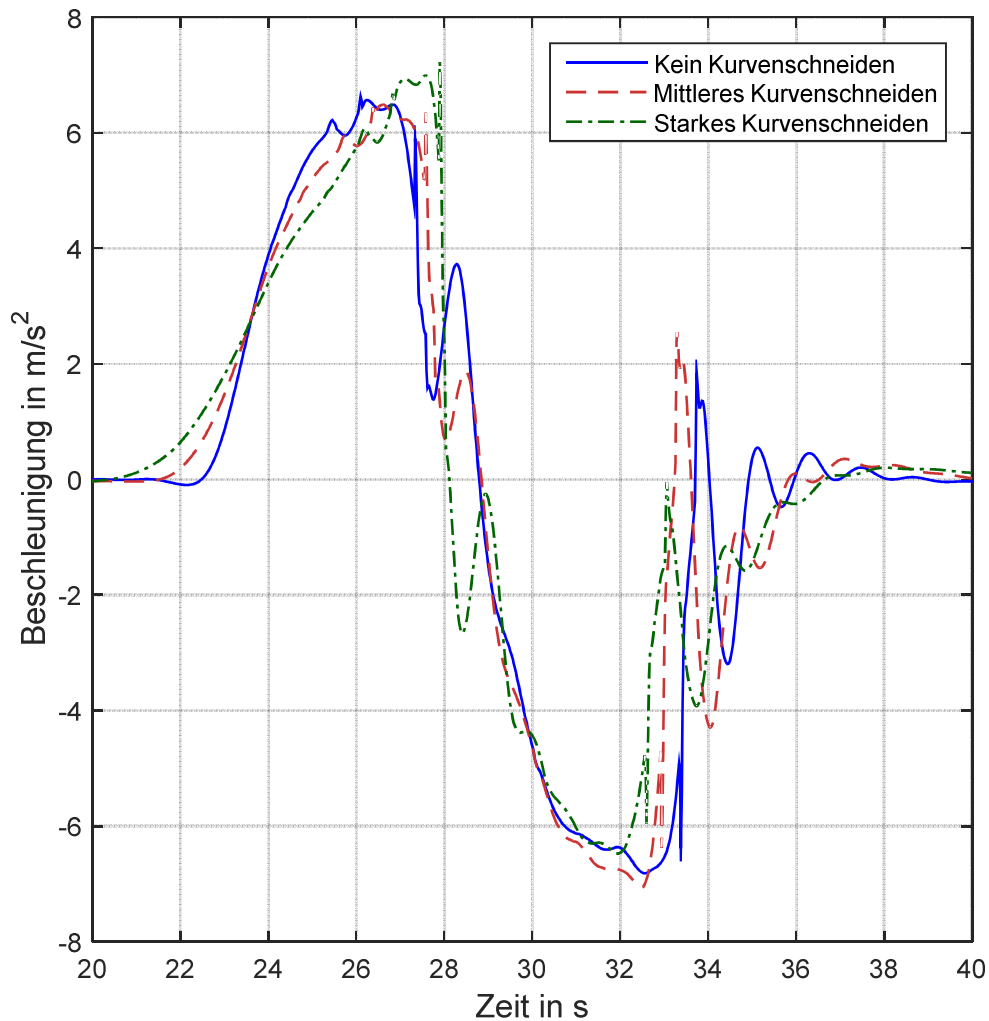


Abbildung 6: Beschleunigungsverläufe eines 7.5 t Lkw für verschiedene Fahrweisen: Kein Kurvenschneiden, mittleres Kurvenschneiden (50 % Ausnutzung der vorgegebenen Fahrbahnbreite), starkes Kurvenschneiden (100 % Ausnutzung der vorgegebenen Fahrbahnbreite von 4 m)

¹¹⁰ Welche Auswirkungen der Beschleunigungsgradient auf Ladungssicherungssysteme hat, ist zu untersuchen (vgl. Kapitel 4).

Weitere zu berücksichtigende Aspekte bei der dynamischen Fahrprüfung

Für den praktischen Fahrversuch ist ein geeignetes Testgelände, ein geeignetes und mit Messtechnik ausgestattetes Fahrzeug sowie entsprechend geschultes Personal zur Be- und Entladung (inklusive Sicherung) der Ladung, Aufnahme und Auswertung der Messwerte sowie zur Beurteilung des Verhaltens der Ladungssicherungssysteme notwendig. Das macht die praktischen Fahrversuche langwierig und teuer. Für die Auswertung fehlt zudem eine klare quantitative Definition von Bewertungskriterien für Ladungssicherungssysteme sowie eine Definition eines geeigneten Systems zur Erfassung der erforderlichen Größen.

Des Weiteren sind die Ergebnisse der Fahrversuche davon abhängig, ob die geforderten Werte überhaupt von der Wetterlage erreichbar sind. Bei reduziertem Reibwert ($\mu_{\max} < 0,8$) zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn, beispielsweise durch Niederschlag, sind die geforderten Verzögerungswerte ohne zusätzliche Bremsvorrichtung nicht möglich.

Ferner fehlt in der DIN 12642 eine genaue Definition der vertikalen Transportbelastung während der Manöver. Vertikale Vibrationen haben einen relevanten Einfluss auf Ladungssicherungssysteme (vgl. Kap 2.4).

Überdies sind die Anforderungen an die normgerechten Testfälle mit Zweifeln und Unklarheiten behaftet: Warum beispielsweise ein Ausweichmanöver durch eine S-Kurve dargestellt wird, bleibt ebenso unklar wie die Begründung für die Anforderungen an Messtechnik und Beschleunigungsdauer, die mit dem im Jahre 2015 erschienenen Neuentwurf teilweise drastisch reduziert werden (vgl. Tabelle 1). Wissenschaftliche Untersuchungen, die diese Änderungen begründen, sind nicht bekannt.

Tabelle 1: Vergleich der Anforderungen an den Fahrversuch zwischen den verschiedenen Ausgaben der DIN 12642

Anforderungen an dynamische Fahrprüfung nach DIN 12642	
2006	2015 (Entwurf)
Messsystem	
Variante 1: Drei tri-axiale Beschleunigungssensoren; Positionen: Mittig an der Stirnwand, im Ladungsschwerpunkt, mittig am Heckportal, alle Sensoren auf Höhe des Ladungsschwerpunktes	Variante 1: ein bi-axialer Beschleunigungssensor; Position: Zentrisch oder Ladefläche
Abtastrate = 10 kHz	Abtastrate ≥ 64 Hz
Grenzfrequenz Tiefpassfilter = 100 Hz (CFC60-Filter)	Grenzfrequenz Tiefpassfilter ≥ 25 Hz
Variante 2: zwei bi-axiale Unfalldatenspeicher	Variante 2: zwei bi-axiale Beschleunigungssensoren; Positionen: Mittig an der Stirnwand auf halber Aufbauhöhe, unter dem Fahrzeugboden mittig auf der Hälfte des hinteren Überhangs
Abtastrate = 256 Hz oder 500 Hz	Abtastrate ≥ 64 Hz
Grenzfrequenz Tiefpassfilter = 25 Hz	Grenzfrequenz Tiefpassfilter ≥ 25 Hz
Beschleunigungssignal	
Variante 1: Überschreitung des geforderten Beschleunigungswerts über 50 ms an allen Messpositionen gleichzeitig und Halten des geforderten Beschleunigungswertes $\pm 0,05$ g über 1 s	Variante 1,2: Überschreitung des arithmetischen Mittelwerts über 80 ms oder Halten des geforderten Beschleunigungswertes $\pm 0,05$ g über 1 s
Variante 2: Überschreitung des geforderten Beschleunigungswerts über 50 ms an allen Messpositionen gleichzeitig und Halten des geforderten Beschleunigungswertes $\pm 0,05$ g	

Eignung der Fahrversuche nach DIN 12642

Praktische Fahrversuche gelten bei der Prüfung von Ladungssicherung/-systemen als Benchmark, da sie eine ganzheitliche Untersuchung von Fahrzeug, Ladung und Sicherungsmittel ermöglichen und gleichzeitig eine ausreichende Approximation der Wirklichkeit darstellen sollen. Für das zu zertifizierende Sicherungssystem, das für die Prüfung verwendete Fahrzeug und das gefahrene Fahrmanöver ist diese Aussage zutreffend. Für

andere bzw. veränderte Fahrzeuge (z.B. Änderung beim Beladungszustand), unterschiedliche Testgelände (vertikale Anregung) oder verschiedene Fahrer ergeben sich nicht erhebliche Unterschiede für die Belastung der Ladungssicherungssysteme. Demnach weisen die nach DIN 12642 definierten Fahrversuche für die Evaluation von Ladungssicherungssystemen erhebliche Defizite hinsichtlich Reproduzierbarkeit, Repräsentativität und Relevanz auf. Mit einer strikten Definition der Fahrversuche ist diese Problematik aufzulösen. Allerdings würde hierdurch der ohnehin schon hohe zeitliche und ökonomische Aufwand noch weiter in die Höhe steigen.

Demnach sind Fahrversuche für die allgemeine und praxisgerechte Evaluation von Ladungssicherungssystemen eher eine Notlösung als eine solide Grundlage.

2.3.2.2 Feldtest/Probeversand

Beim Probeversand/Feldtest wird ein Ladegut transportiert und die dabei auftretenden Transportbelastungen aufgezeichnet. Da es sich um einen realen Transportvorgang handelt, treten die Belastungen hierbei kombiniert auf. Die Zuordnung der einzelnen Schadensursachen zu den einzelnen Belastungen sowie die Quantifizierung deren Wirkung wird allerdings bei einer erst nach dem Transportvorgang stattfindenden Schadensanalyse erschwert bzw. ist im Allgemeinen nicht genau möglich.¹¹¹ Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass mit einem Probeversand ein erheblicher Aufwand (der eines realen Transportes) verbunden ist, ohne prospektive Gewissheit auf Erfolg: Erst nach einem Transport kann überprüft werden, ob die relevanten Transportbelastungen überhaupt aufgetreten sind. Da „extreme“ Fahrsituationen und damit verbundene „hohe“ Transportbelastungen äußerst selten auftreten (vgl. Kap. 4), ist die Wahrscheinlichkeit auf Erfolg sehr gering. Ein Probeversand ist demnach für eine systematische Prüfung und Bewertung von Ladungssicherungssystemen nicht geeignet.

2.4 Vertikale Vibrationen und deren Wirkung

Nach dem in Europa anerkannten Stand der Technik wird die Überlagerung der Gewichtskraft der Ladung durch Vibrationen und Stöße durch die Elastizität der Zurrmittel und die Dämpfelemente im Fahrwerk des Lkw und Anhänger ausgeglichen, da hierdurch keine Erhöhung der Transportbelastungen stattfinden soll. Somit werden die vertikalen Vibrationen in der, praxisorientierten Ansatz vertretenden, DIN EN 12195 vernachlässigt.¹¹²

¹¹¹ Vgl. Großmann G. et al: Transportsichere Verpackung und Ladungssicherung, 2005, S. 49 ff

¹¹² Vgl. DIN EN 12195-1, 2010, S. 12

In Europa bleiben demnach im Gegensatz zu Australien und Nordamerika, wo vertikale Vibrationen mit 0,2 g gegen Abheben der Ladung bei Schlecht-Weg-Strecken^{113,114} berücksichtigt werden, teilweise schon über 20 Jahre alte Erkenntnisse über die Wirkung von vertikalen Vibrationen unberücksichtigt.

Mercer¹¹⁵ zeigte anhand von Fahrversuchen (40 km auf einer „normalen“ Straße), dass die Möglichkeit eines fast vollständigen Vorspannkraftverlusts für Ketten sowie für Zurrgurte bei einem normalen Transport besteht.

Rakheja¹¹⁶ untersuchte zur gleichen Zeit die Wirkung der vertikalen Vibrationen auf die Reibung zwischen Ladung und Ladefläche auf einem Prüfstand, mit dem Sinusschwingungen sowie die Vibrationen eines 3-Achs-Trailers synthetisiert wurden. Die Minima der gemittelten Reibwerte bei einer Sinus-Anregung sind abhängig von der Anregungsfrequenz sowie von der Elastizität der Ladefläche und der Ladung und liegen bei 2 Hz. Die gemittelten Reibwerte bei stochastischer Anregung (3-Achs-Trailer) liegen im Bereich der statischen Reibwerte. Bei 25 % der Testzeit (14 s) liegt der Reibwert jedoch unter 75 % des gemittelten Reibwertes. Ähnliche Ergebnisse wurden auch beim Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund erzielt: Bei einer vertikalen Anregung gemäß ASTM 4728 wurden die Reibwerte auf „ein Minimum“ reduziert¹¹⁷. Die Veränderung des Reibwertes findet nicht nur zwischen Ladegut und Ladefläche statt, sondern auch zwischen einzelnen Ladegutlagen. So ändern sich bei granularen Ladegütern (Schüttgut) beispielsweise die Fließeigenschaften in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz¹¹⁸.

Ferner besteht bei nach oben ungesicherter Ladung (z.B. horizontaler Formschluss mit Ladelücken) die Möglichkeit, dass das Ladegut vollständig abhebt und anfängt zu „wandern“.¹¹⁹

¹¹³ Vgl. NTC Australia: Load Restraint Guide, 2004, S. 21

¹¹⁴ Vgl. NSC Standard 10: Cargo Securement, 2013, S. 10 ff

¹¹⁵ Vgl. Mercer, W. et al.: Effect of Cargo and Tiedown Characteristics, 1997, S. 11 ff

¹¹⁶ Vgl. S. Rakheja: Experimental Evaluation of Friction, 1997

¹¹⁷ Vgl. Flog: Untersuchungen von Reibungskräften, 2007

¹¹⁸ Vgl. Kollmann, T.: Schwingungsinduziertes Fließen, 2002, S. 154

¹¹⁹ Vgl. Biermann, N.: Berechnungsansatz zur Auslegung von Kunststofffolien, S. 134 f

2.5 Fazit zum Stand der Technik

Erfahrungsbasierte Verfahren sind aufgrund ihrer Personenbezogenheit und der nicht garantierten hinreichenden Lösungsfindung für die allgemeine Evaluierung von Ladungssicherungssystemen ungeeignet.

Modellbasierte Rechenverfahren zur Prüfung und Dimensionierung von Ladungssicherungssystemen weisen viele Vorteile auf: Sie sind schnell und variabel und benötigen einen geringen Personal- und Materialeinsatz. Allerdings ist die Aussagekraft von der Modellgüte abhängig. Je genauer das Modell ist, umso höher ist die Aussagekraft, aber umso höher ist auch der Aufwand zur Erstellung und Parametrierung. Die größte Schwäche der modellbasierten Verfahren im Bereich Ladungssicherung liegt allerdings in der fehlenden Validierung. Dies ist auf zwei Aspekte zurückzuführen: Zum einen die Vielfalt an unterschiedlichen Ladetypen, Transportmitteln und Transportbelastungen und dem daraus resultierenden hohen Aufwand für die erforderlichen Großversuche. Zum anderen die fehlende Eignung der bestehenden experimentellen Verfahren für die Durchführung der Versuchsreihen mit den üblichen Ladegutabmessungen.

Die Prüfstände zur Untersuchung von Ladungen bzw. Ladungssicherungsmaßnahmen bilden die relevanten Transportbelastungen für eine „exakte“ Untersuchung von Ladungssicherungssystemen nur unzureichend ab. Die Fahrversuche nach DIN 12642 weisen zudem noch Schwächen in der Reproduzierbarkeit auf. Wie relevant die Testfälle der experimentellen Verfahren für das reale Verkehrsgeschehen sind, bleibt offen.

Die heutigen Verfahren zur Evaluierung von Ladungssicherungssystemen gewährleisten keine umfassende und reproduzierbare Untersuchung anhand nachvollziehbarer Kriterien und Lastfällen. Hierdurch ist eine ökonomische und sicherheitstechnische Optimierung der Ladungssicherungssysteme sowie die Erfüllung der steigenden Effizienzanforderungen im Transportgewerbe nicht möglich.

Um das Ladungsverhalten und die Ladungssicherung reproduzierbar zu untersuchen und zukünftig modellbasierte Verfahren zu validieren, besteht demnach die Notwendigkeit nach einem neuen Verfahren, bei dem alle relevanten Transportbelastungen (horizontal und vertikal) simultan und in ausreichender Länge abgebildet werden. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit sowie dem erforderlichen Aufwand bei der Validierung von Modellen ist hierfür nur ein Prüfstandversuch geeignet. Aufgrund der Darstellbarkeit hochdynamischer Belastungen wird im Weiteren das Prinzip des Beschleunigungsschlittens verfolgt.

Für die Entwicklung einer entsprechenden Prüfvorrichtung ergeben sich folgende aufeinander aufbauende Fragestellungen:

- Welche allgemeinen technischen Anforderungen ergeben sich an Ladungssicherungssysteme?

- Welche Transportbelastungsparameter sind für die Evaluation von Ladungssicherungssystemen relevant und welche Auswirkungen haben diese auf die identifizierten Anforderungen?
- Wie können die identifizierten Anforderungen anhand der relevanten Transportbelastungsparameter im Labor überprüft werden?

3 Anforderungen an Ladungssicherungssysteme

Ziel der Ladungssicherung ist, unerwünschte Ereignisse während dem Güterumschlag und dem Transport zu verhindern und somit eine Betriebs- und Beförderungssicherheit zu gewährleisten.

Um bei technischen Systemen möglichst alle Ursachen und Ausfallkombinationen, die zu einem unerwünschten Ereignis – einem sogenannten Top-Event – führen, zu identifizieren sowie um entsprechende Zuverlässigkeitskenngrößen zu ermitteln, wird im Zuge der technischen Produktentwicklung häufig die sogenannte Fehlerbaumanalyse (FTA *Fault Tree Analysis*) durchgeführt.

Diese Methode wird im weiteren Verlauf für Ladungssicherungssysteme angewendet. Anhand der einzelnen Ursachen, die zu den beiden Top-Events, der Verletzung der Betriebs- und Beförderungssicherheit (vgl. Kap. 1.2.2) führen, werden die Zusammenhänge aufgezeigt sowie generelle Anforderungen an Ladungssicherungssysteme und zugehörige Auslegungskriterien abgeleitet, die einen „sicheren“ Umschlag und Transport ermöglichen. Dieses Vorgehen ermöglicht das Auffinden aller Ursachen und das Ableiten entsprechender Auslegungskriterien ohne Beeinflussung durch existierende Vorschriften, Normen oder Richtlinien, die teilweise in der Praxis nicht umzusetzende Missinterpretationen enthalten, wie bspw. §22 StVO, in der gefordert wird, dass sich die Ladung nicht bewegen darf.

3.1 Fehlerbaumanalyse Beförderungssicherheit

Die Beförderungssicherheit wurde nicht gewährleistet bzw. ist nachweislich verletzt worden, wenn die Ladung einen Schaden erlitten hat. Ein Schaden liegt vor, sobald die Ladung eine geforderte Eigenschaft aufgrund des Transportes bzw. des Umschlag- oder Lagerprozesses (TUL-Prozess) nicht mehr erfüllt/aufweist. Je nach Ladung (Ladegut/Ladeeinheit/darin gebundenes Produkt) ist demnach ein Schaden unterschiedlich definiert sein. Beispiele hierfür sind:

- die Materialflussfunktion ist eingeschränkt, z.B.: Eine Ladeeinheit ist aufgrund von unzulässig großen Verformungen nicht in einem Hochregal lagerbar.
- die Hauptfunktion ist eingeschränkt, z.B.: Obst weist Druckstellen auf und ein Verkauf ist nicht mehr zum vollen Preis bzw. überhaupt nicht mehr möglich.
- die Marketingfunktion ist eingeschränkt, z.B.: Die Verkaufsverpackung eines Produktes ist eingerissen.

Eine Schädigung tritt ein sobald die äußere Belastung resultierend aus dem TUL-Prozess B_{TUL} bzw. die daraus resultierende innere Beanspruchung X_{TUL} die Beanspruchbarkeit der Ladung BE_{La} übersteigt. Daraus resultiert die allgemeine Anforderung zur Erfüllung der Beförderungssicherheit:

$$BE_{\text{LA}} \geq X_{\text{TUL}} \quad (3.1)$$

Die technischen Ursachen für den jeweiligen zu definierenden Schaden sind abhängig von den Materialeigenschaften der Ladung. In Anlehnung an die allgemeine Konstruktionslehre sind folgende Schadensursachen möglich¹²⁰ :

- Unzulässige Verformung (abhängig von Kraft, aber auch von Zeit und Temperatur beim Kriechen)
- Gewaltbruch (Überschreitung einer Grenzspannung im Material)
- Zeit und Dauerbruch (Überschreitung einer Grenzspannung bei einer Vorgesichte (Schwingspiel))
- Instabilität = Knicken/Beulen (Überschreitung einer Spannung)
- Mechanische Abnutzung (Verschleiß)
- Chemische und sonstige Angriffe (Korrosion, UV)

¹²⁰ Vgl. Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente, 2011, S. 37

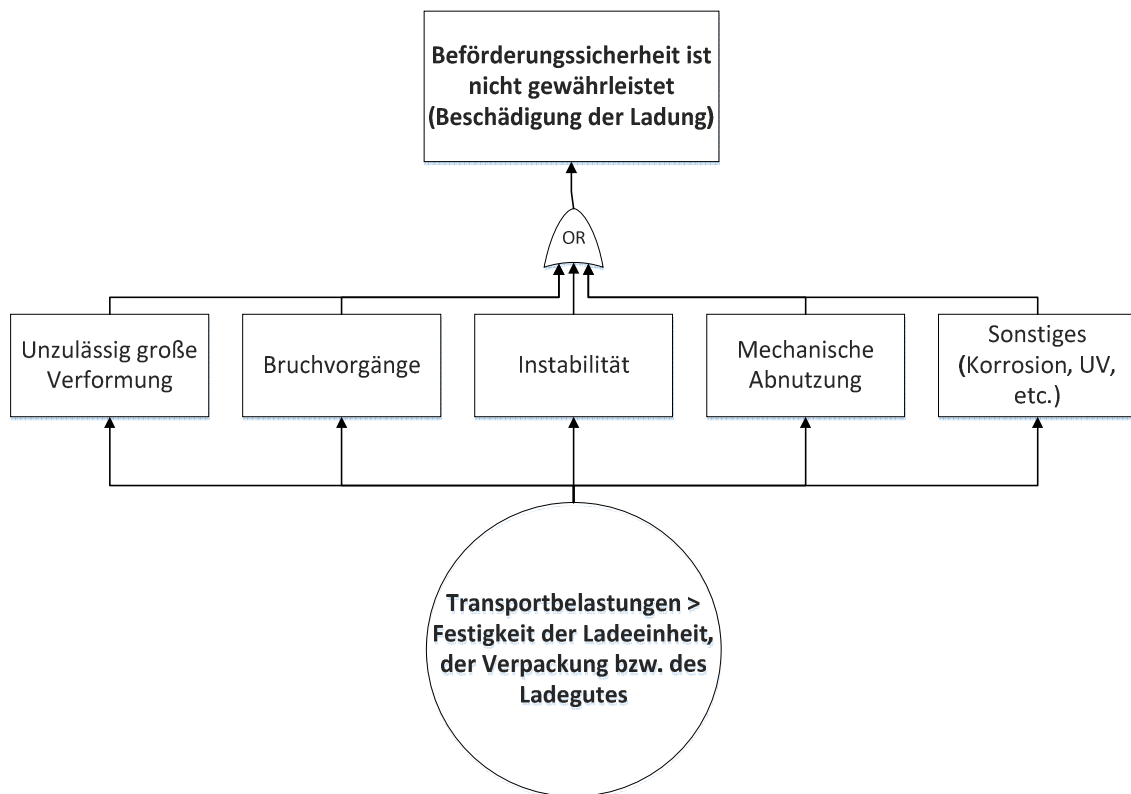


Abbildung 7: Fehlerbaum Beförderungssicherheit

Durch die Vielfalt der möglichen Ladegüter, der Schadensdefinitionen, deren möglichen Ursachen sowie der Unkenntnis über die Übertragungsfunktion zwischen der äußeren Belastung und der inneren Beanspruchung einer Ladung (z.B. mit Schüttgut gefüllte FIBC) ist eine konkrete Definition von anwendbaren technischen Grenzwerten (z.B. einer allgemein zulässigen Druckspannung) nicht möglich. Hierzu sind je nach Ladegut spezifische Angaben des Ladegutherstellers bzw. des jeweiligen Kunden notwendig. Falls vorhanden sind konkrete Definitionen bzw. die Vorgehensweise bei der Definition aus allgemeinen Richtlinien/Normen zu entnehmen, wie sie z.B. für fertige Versandstücke und Ladeeinheiten existent sind:

- DIN EN ISO 4180¹²¹: Verpackung – Versandfertige Packstücke – Allgemeine Regeln für die Erstellung von Prüfplänen
- DIN EN 15552¹²²: Verpackung – Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten – Prüfpläne für gewöhnliche Transportketten
- VDI 3968¹²³: Sicherung von Ladeeinheiten - Anforderungsprofil

¹²¹ Vgl. DIN EN ISO 4180:2010

¹²² Vgl. DIN EN 15552:2008

¹²³ Vgl. VDI 3968, 2009

3.2 Fehlerbaumanalyse Betriebssicherheit

Die Betriebssicherheit stellt eine Kombination aus Verkehrssicherheit und Arbeitsschutz dar. Oberste Prämisse ist dabei die Vermeidung einer unnötigen, von der Gesellschaft nicht akzeptierten, Gefährdung von Personen – insbesondere unbeteiligter Dritter¹²⁴. In Abbildung 8 ist der Fehlerbaum für die Betriebssicherheit dargestellt. Auf die einzelnen Stufen des Baums wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

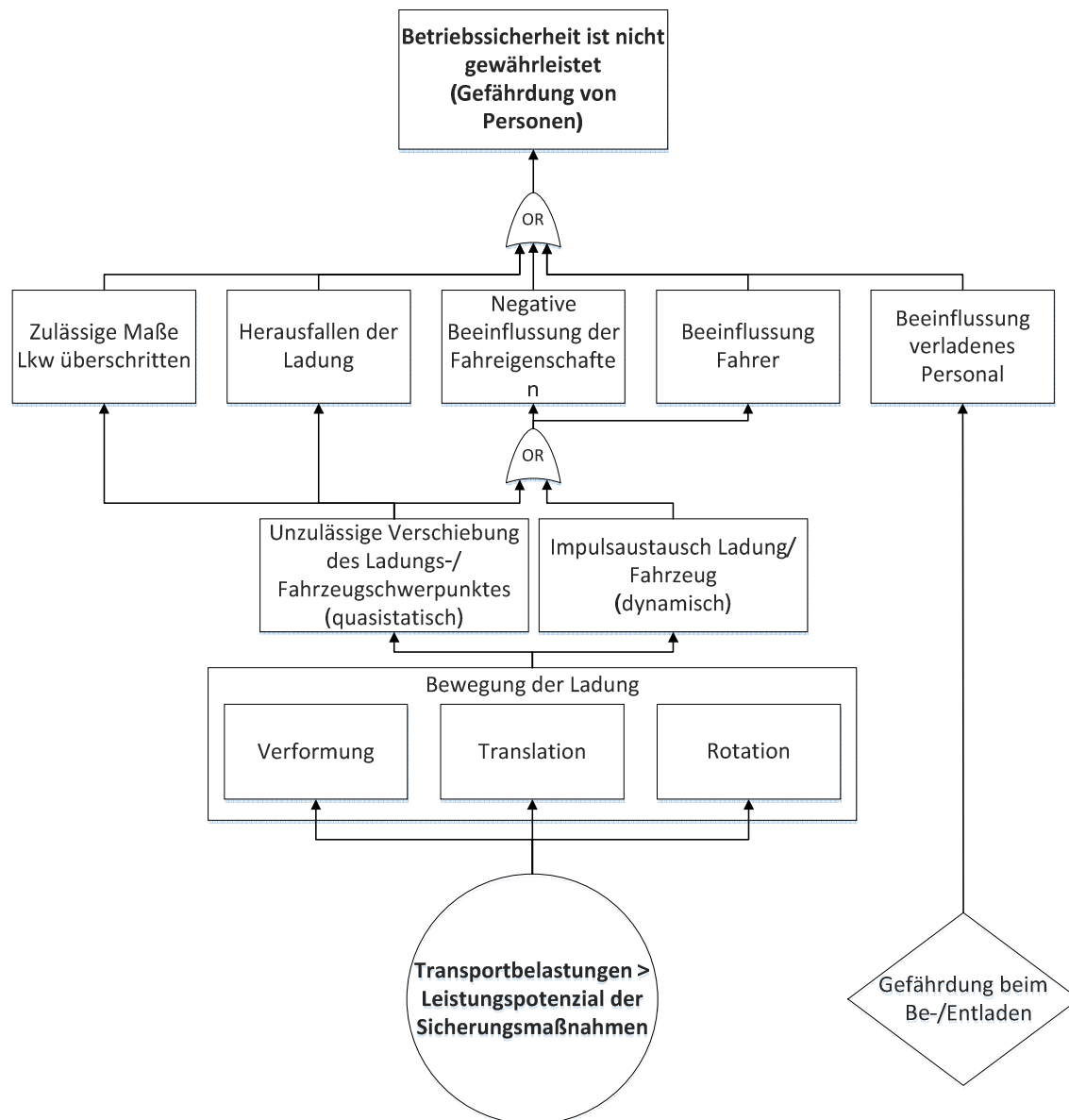


Abbildung 8: Fehlerbaumanalyse Betriebssicherheit

¹²⁴ Vgl. BGI 649: Ladungssicherung auf Fahrzeugen, 2002, S. 4 f

3.2.1 Gefährdung von Personen

Eine Gefährdung von Personen im Straßenverkehr wird durch vielfältige Ursachen herbeigeführt. Im Folgenden werden nur diejenigen Ursachen für die Gefährdung von Personen aufgeführt, die direkt oder indirekt durch eine unsachgemäße Ladungssicherung herbeigeführt werden:

- **Herabfallende Ladung:** Eine Ursache für die Gefährdung von Personen durch Ladungssicherung stellt der Verlust von Ladegütern während des Transports dar.¹²⁵ Diese verlorenen Güter weisen (ab einer kritischen Größe) zweifelslos ein hohes Gefahrenpotenzial für andere Verkehrsteilnehmer aus.
- **Negative Beeinflussung der Fahreigenschaften:** Fahrzeuge, deren fahrdynamische Eigenschaften über ein vertretbares Maß¹²⁶ negativ verändert werden, besitzen ein hohes Gefahrenpotenzial¹²⁷ da möglich ist, dass infolge der negativen Eigenschaften unkontrollierbarem Fahrverhalten auftritt, welches zu Schäden am eignen Fahrzeug oder zu Kollisionen mit anderen Fahrzeugen bzw. Personen führt. Als mögliche negativ beeinflussten Eigenschaften sind insbesondere die Lenk sowie Bremseigenschaften zu nennen.
- **Beeinflussung Fahrer:** Eine negative Beeinflussung des Fahrers¹²⁸ durch eine Behinderung der Sicht, des Gehörs, der Aufmerksamkeit und des Bewegungsraums führt zu einem erhöhten Risiko für den Fahrer sowie für unbeteiligte Verkehrsteilnehmer.
- **Zulässige Maße Lkw überschritten:** Damit Fahrzeuge eine ausreichende Kompatibilität zu den üblichen Verkehrswegen/Straßen aufweisen, sind die maximal zugelassen Fahrzeugmaße festgeschrieben¹²⁹. Eine Überschreitung dieser Maße – insbesondere die Fahrzeugbreite, die abgestimmt mit der Fahrbahnbreite ist – stellt eine Gefährdung für die anderen Verkehrsteilnehmer dar. Insbesondere bei verengten Fahrstreifenbreiten wie beispielsweise bei Autobahnbaustellen stellt dies eine Gefährdung da.
- **Gefährdung verladen Personal:** Das Be- und Entladen stellt eine gesonderte Rolle bei der Betriebssicherheit dar, da dies die einzige Phase des Transportes darstellt, in der Personen direkten Kontakt mit der Ladung haben. Eine vermeidbare Gefährdung wird durch viele Aspekte verursacht, die größtenteils dieselben

¹²⁵ Vgl. StVO §22

¹²⁶ Ein vertretbares Maß ist zukünftig zu definieren.

¹²⁷ Vgl. BGV D29 -UVV §37, 2007

¹²⁸ Vgl. StVO §23

¹²⁹ Vgl. Richtlinie 96/53/EG, 1996

Ursachen besitzen wie die der oben genannten. Ergänzend ist die Gefährdung durch das Sicherungsmittel selbst zu nennen (z.B. peitschender Gurt, Bewegung der Ladung durch einseitiges Lösen von Sicherungsmitteln)

Die oben genannten Ursachen für die Gefährdung von Personen lassen sich generell auf zwei Gegebenheiten zurückführen: zum einen auf eine unzulässige Verschiebung des Ladungsschwerpunktes und zum anderen auf einen inakzeptablen Impulsaustausch bzw. eine unzulässig hohe Kraftabstützung zwischen Ladung und Fahrzeug. Die Definition entsprechender Grenzwerte ist situationsabhängig und wird in den folgenden Unterkapiteln vorgenommen/angesprochen.

3.2.2 Unzulässige Verschiebung des Ladungsschwerpunktes

Sobald sich der Schwerpunkt der gesamten Ladung bzw. unter Umständen einzelner Ladegüter über ein Grenzmaß hinaus in einer Raumrichtung verschiebt, führt dies alleine oder in Kombination mit dem Impulsaustausch zu einem der fünf genannten Ursachen der Personengefährdung. Das Grenzmaß sowie die Raumrichtung sind hierbei abhängig von der übergeordneten Ebene (Zielursache).

Während die Überschreitung der zugelassenen Lkw-Maße, das Herausfallen der Ladung oder einzelner Ladegüter sowie die Beeinflussung des Fahrers (Sicht, Bewegungsfreiheit) spätestens nach dem Auftritt der Gefährdung nachvollziehbar ist, bedarf das Erkennen einer negativen Beeinflussung der Fahreigenschaften einer tiefergehenden Betrachtung, wie in Abschnitt 3.2.2.1 bis 3.2.2.3 vorgenommen.

3.2.2.1 Beeinflussung der Lenk- und Bremseigenschaften

Die Dynamik von Fahrzeugen wird durch die an den Rädern angreifenden Längs- und Querkräfte bestimmt. Diese an den Rädern angreifenden Führungskräfte sind lediglich vom Reibwert μ zwischen Reifen und Fahrbahn und der anliegenden vertikalen Kraft F_z abhängig.¹³⁰ Üblicherweise werden Fahrzeuge nicht mit Hilfe aller vorhandenen Räder/Achsen gelenkt oder angetrieben. Eine Bremsung erfolgt gewöhnlich über eine bestimmte (heutzutage adaptive) Bremskraftverteilung, die die Bremskräfte zwischen den einzelnen Rädern/Achsen aufteilt. Demnach hängen die Lenkfähigkeit, der mögliche Vortrieb sowie das Bremsverhalten¹³¹ von der Gesamtschwerpunktposition ab.¹³² Da bei

¹³⁰ Vgl. Haken, K.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, 2008, S. 35 ff

¹³¹ Wegen des degressiven Verlaufs zwischen übertragbarer horizontal Kraft und Normalkraft wirkt sich auch bei einer idealen Bremskraftverteilung die Gewichtsverteilung auf das Bremsverhalten aus.

¹³² Vgl. Haken, K.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, 2008, S. 213 ff

Transportfahrzeugen die Ladungsmasse den Großteil der Fahrzeugmasse ausmacht (be-laden-leer-Verhältnis $k_{load} = \frac{m_{full}}{m_{empty}}$ von bis zu 15 im Anhängerbetrieb¹³³), wird die Ge-samtschwerpunktposition maßgeblich von der Ladungsposition bestimmt. Sobald zuläs-sige Achslasten unterschritten bzw. die Achslasten ungünstig verteilt sind, werden die oben genannten Fahreigenschaften eingeschränkt. Informationen über die zulässige Schwerpunktposition der Ladung ist dem Lastverteilungsplan (vgl. Abbildung 9) zu ent-nehmen bzw. mit Hilfe der Momentgleichgewichte um die Achsen zusammen mit den maximal zulässigen Achslasten, der zugelassenen Nutzlast und der Mindestachslast zu berechnen. Der so aus insgesamt mehreren Teilstücken bestehende Lastverteilungsplan bzw. Lastverteilungsgrenzkurve *LVP* (vgl. Abbildung 9) berechnet sich mit den Variablen aus Tabelle 2 wie folgt:¹³⁴

Tabelle 2: Variablen zur Berechnung des Lastverteilungsplans

Symbol	Einheit	Beschreibung
$F_{fzg, bel, zul}$	N	Gewichtskraft des beladenen Fahr-zeugs
$F_{fzg, leer}$	N	Gewichtskraft des unbeladenen Fahr-zeugs
F_{La}	N	Gewichtskraft der Ladung
$F_{z, VA, zul}$	N	Zulässige Vorderachslast
l	m	Radstand
l_h	m	Abstand des Schwerpunktes des Fahr-zeugs von der Hinterachse
l_{La}	m	Abstand des Schwerpunktes der La-dung von der Hinterachse
$\Delta F_{z, VA, zul}$	-	Auf die Gewichtskraft des beladenen Fahrzeugs bezogene Mindestachslast der Vorderachse
$\Delta F_{z, HA, zul}$	-	Auf die Gewichtskraft des beladenen Fahrzeugs bezogene Mindestachslast der Vorderachse

¹³³ Vgl. Hecker, F.: Stabilisierungsfunktionen im Nutzfahrzeug, 2015, S. 797

¹³⁴ Vgl. VDI 2700 Blatt 4, 2012

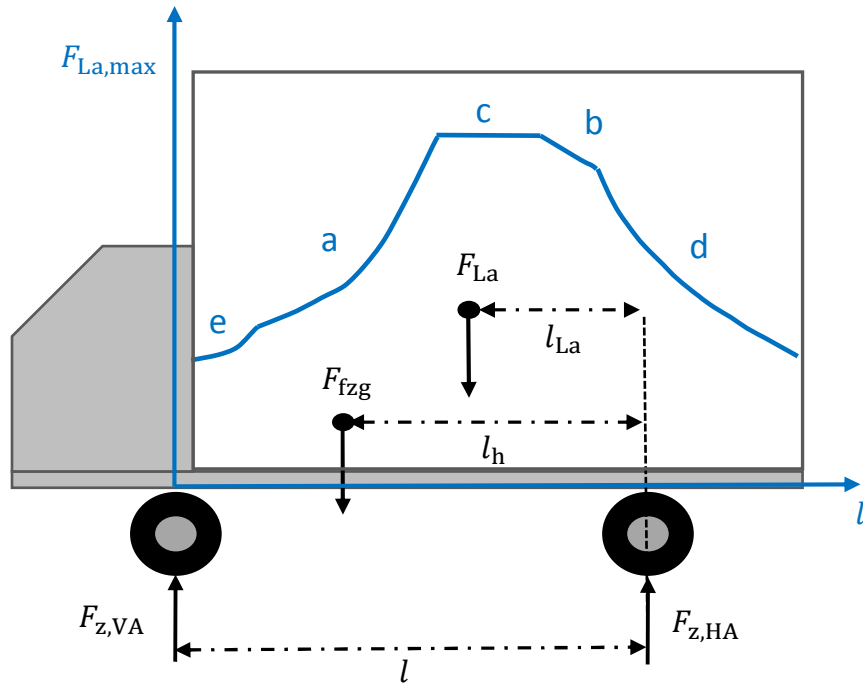


Abbildung 9: Freikörperbild eines Zwei-Achs-Lkw zur Berechnung des Lastverteilungsplans sowie (skizzierte) Darstellung des Lastverteilungsplans

- Grenzlast für die Einhaltung der zulässigen Vorderachslast (Kurve a)

$$F_{La,VA,max} = \frac{F_{z,VA,zul} \cdot l - F_{fzg,leer} \cdot l_h}{l_{La}} \quad (3.2)$$

- Grenzlast für die Einhaltung der zulässigen Hinterachslast (Kurve b)

$$F_{La,HA,max} = \frac{F_{z,HA,zul} \cdot l - F_{fzg,leer} \cdot (l - l_h)}{l - l_{La}} \quad (3.3)$$

- Grenzlast für die Einhaltung der zulässigen Nutzlast (Kurve c)

$$F_{La,max} = F_{fzg,bel,zul} - F_{fzg,leer} \quad (3.4)$$

- Grenzlast für die Einhaltung der Mindestlenkachslast (Kurve d)

$$F_{La,lenk,max} = F_{fzg,leer} \cdot \frac{\frac{l_h}{l} - \Delta F_{z,VA,zul}}{\Delta F_{z,VA,zul} - \frac{l_{La}}{l}} \quad (3.5)$$

- Grenzlast für die Einhaltung der Mindestantriebslast (Kurve e)

$$F_{La,max} = \frac{F_{fzg,leer}(l - l_h) - \Delta F_{z,HA,zul} \cdot l}{\Delta F_{z,HA,zul} - l + l_{La}} \quad (3.6)$$

Der Ermittlung der zulässigen longitudinalen Ladungsverschiebung $\Delta x_{La,zul}$ geht demnach eine Bestimmung der zulässigen longitudinalen Ladungsposition $l_{La,zul}$ anhand der

Formeln (3.2) bis (3.6) voran. In Abhängigkeit der Position der Ladung direkt nach dem Beladen $l_{\text{Ladung, bel}}$ ist $\Delta x_{\text{Ladung, zul}}$ zu bestimmen. An dieser Stelle ist diese Berechnung beispielhaft für die Einhaltung der maximalen Vorderachslast aufgeführt:

$$\Delta x_{\text{La, zul}} \leq \frac{F_{\text{z, VA, zul}} \cdot l - F_{\text{fzg, leer}} \cdot l_{\text{h}}}{F_{\text{La, VA, max}}} - l_{\text{La, zul}} \quad (3.7)$$

Die zulässige Verschiebung hängt demnach nicht nur von den Fahrzeugparametern, sondern in gleicher Weise von der Ladung selbst ab. Hierdurch ist nach jeder Teilbeladung/-entladung eine Neuberechnung notwendig.

3.2.2.2 Beeinflussung der Kippstabilität

Nutzfahrzeuge weisen aufgrund der hohen Schwerpunkthöhe im Verhältnis zur Spurweite eine im Vergleich zu Pkw erhöhte Kippneigung auf. In den zahlreichen, seit den 60ern Jahren¹³⁵ durchgeführten Forschungsarbeiten wurden diverse Kennwerte und Methoden zur Quantifizierung der Kippneigung von Fahrzeugen entwickelt. Diese lassen sich grundsätzlich in modellbasierte sowie experimentelle Verfahren und jeweils noch weiter in statische und dynamische aufteilen¹³⁶. Im Gegensatz zu den dynamischen Kennwerten, die aufgrund der Wechselwirkungen zwischen der Aufbaudynamik, dem Fahrwerk und der Fahrbahn analytisch schwer quantifizierbar sind, stellen die für stationäre Bedingungen geltenden quasistatische Kennwerte (Steady State Rollover Threshold - SSRT), mit den simpel zu lösenden Formeln, die gebräuchlichste Methode dar um die Kippstabilität hinreichend genau und relativ einfach zu quantifizieren¹³⁷. Der SSRT entspricht der maximalen Querschleunigung eines Fahrzeugs unter stationären Bedingungen. Untersuchungen von Ervin et. al.¹³⁸ zeigen sogar einen direkten Zusammenhang zwischen dem SSRT und der Wahrscheinlichkeit von Kippunfällen von Nutzfahrzeugen (vgl. Abbildung 10).

¹³⁵ Vgl. Baumann F.W.: Untersuchung zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, 2003

¹³⁶ Vgl. Metz, L. et al: Comparison of Linear Roll Dynamics Properties for a Various Vehicle, 1992

¹³⁷ Vgl. Dahlberg E.: Commercial Vehicle Stability – Focusing on Rollover, 2001, S. 9

¹³⁸ Vgl. Ervin, R. et al.: The Influence of Size and Weight Variables on the Roll Stability, 1983

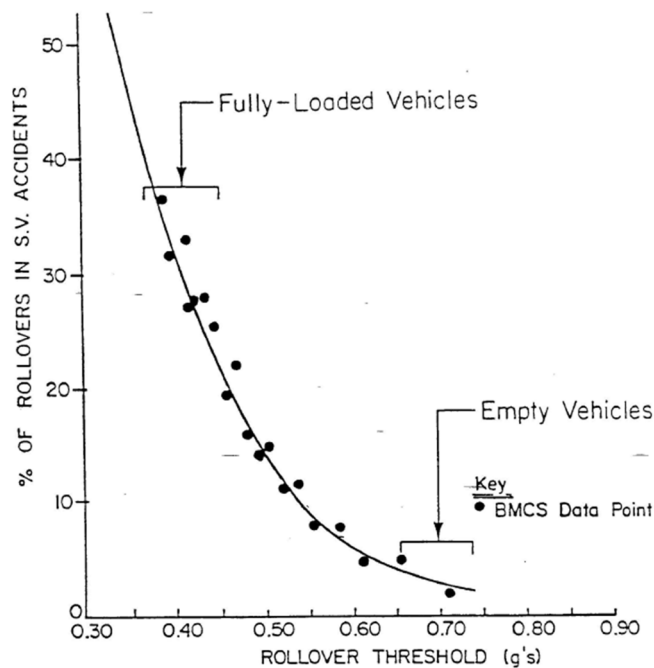


Abbildung 10: Umkipprate von Nutzfahrzeugen bezogen auf den SSRT (Punkte: Ermittelte Messwerte; Kurve: Approximierter Verlauf)¹³⁹

Bei der einfachsten Ausprägung des SSRT werden alle Elastizitäten vernachlässigt und das Fahrzeug als Starrkörper betrachtet. Mit diesem Ansatz wird der sehr gebräuchliche Static Stability Factor (SSF) ermittelt. Mit dem SSF wird allerdings die Kippgrenze eines Fahrzeugs überschätzt: Werden mehr Elastizitäten des Fahrzeugs modelliert, sinkt der berechnete SSRT auf bis zu 64 % des SSF ab. Mit den 64 % beschreibt der SSF dennoch den dominierenden Effekt für das Kippen eines Fahrzeugs in stationären Fahrmanövern¹⁴⁰. Weiterführende Informationen über das Kippverhalten von Fahrzeugen sind der entsprechenden Fachliteratur^{141,142,143,144} zu entnehmen.

Die Anwendung des SSF zur Bestimmung eines maximal zulässigen lateralen Versatzes der Ladung Δy_{La} führt nach den oben genannten Erkenntnissen zu einer konservativen Auslegung der Ladungssicherungsmaßnahmen und wird, wie auch in der VDI-Richtlinie

¹³⁹ Ervin, R. et al.: The Influence of Size and Weight Variables on the Roll Stability, 1983

¹⁴⁰ Vgl. Rakheja, S. et al.: Development of Directional Stability Criteria for an Early Warning Safety Device, 1990

¹⁴¹ Vgl. Winkler, C.: Rollover of Heavy Commercial Vehicles, 2000

¹⁴² Vgl. Isermann H.: Die Kippgrenze von Sattelkraftfahrzeugen mit fester und flüssiger Ladung, 1970

¹⁴³ Vgl. Dahlberg E.: Commercial Vehicle Stability – Focusing on Rollover, 2001

¹⁴⁴ Vgl. Baumann F.: Untersuchung zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, 2003

zur Ermittlung des lateralen Lastverteilungsplans, in dieser Arbeit für die zulässige laterale Verschiebung angewendet. Die Definition von Δy_{La} erfolgt in Abhängigkeit einer noch vertretbaren Änderung des stationären Kippschwellwertes ΔSSF bzw. eines allgemein definierten Mindestkippschwellwertes SSF_{\min} .

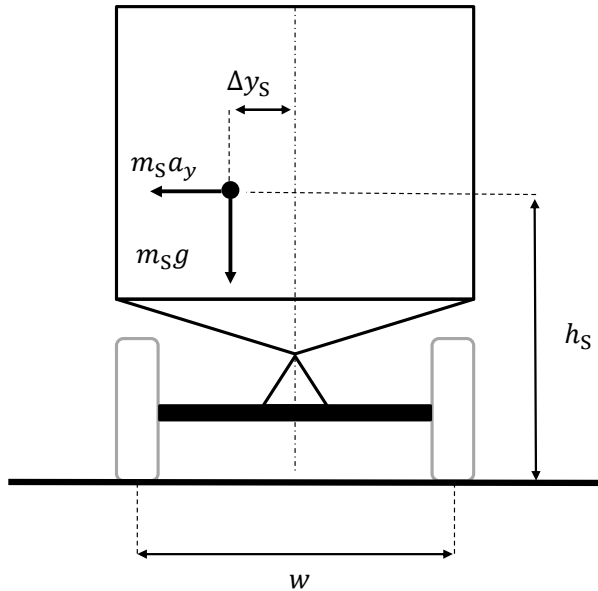


Abbildung 11: SSF-Kippmodell

Der SSF berechnet sich nach Abbildung 11 wie folgt:

$$SSF = \frac{w - \Delta y_s}{2h_s} \quad (3.8)$$

Mit

$$\Delta y_s = m_{La} \cdot \frac{\Delta y_{La}}{m_s} \quad (3.9)$$

ergibt sich:

$$SSF = \frac{\frac{w}{2} \cdot \left(1 - \frac{2}{w} \Delta y_{La} \cdot \frac{m_{La}}{m_s}\right)}{h_s} + 1 \quad (3.10)$$

Für den noch zulässigen laterale Verschiebung $\Delta y_{La,zul}$ ergibt sich bei Verwendung des Mindestkippschwellwertes SSF_{\min} (z.B. 4 m/s^2 ; entspricht dem Mindestkippschwellwertes eines vollbeladenen Tankfahrzeugs¹⁴⁵):

¹⁴⁵ Vgl. ECE-R 111, 2001

$$\Delta y_{La,zul} = \frac{m_s}{m_{La}} \cdot \left(\frac{w}{2} - SSF_{\min} \right) \quad (3.11)$$

bzw. bei Definition einer maximalen Änderung des Kippwertes:

$$\Delta y_{La,zul} = \frac{m_s}{m_{La}} \cdot \frac{w}{2} \Delta SSF \quad (3.12)$$

Die Kippstabilität eines Fahrzeugs wird, aufgrund der Lage der Wankachse, der unterschiedlichen Achsfedersteifigkeiten, der Torsionssteifigkeit des Aufbaus etc., auch von einer longitudinalen Ladungsverschiebung beeinflusst. Versuche des US-Militärs¹⁴⁶ zeigen eine Änderung der Kippgrenze eines nicht näher definierten Lkws von ca. 10 % bei einer longitudinalen Verschiebung des Gesamtschwerpunktes um ca. 230 cm. Solche Verschiebungen sind für die im Straßenverkehr aktuell angewendete Ladungssicherungsmethoden nicht relevant¹⁴⁷. Daher wird die Beeinflussung der Kippstabilität durch longitudinale Verschiebung vernachlässigt.

3.2.2.3 Beeinflussung der mechatronischen Systeme im Fahrzeug

Ein in Zukunft immer weiter an Bedeutung zunehmender Faktor ist die Beeinflussung der mechatronischen Systeme im Fahrzeug – insbesondere der Fahrerassistenzsysteme der Stabilisierungsebene¹⁴⁸. Neben der bereits erwähnten Änderung der Radlasten wird durch eine Verschiebung der Ladung auch das Eigenlenkverhalten signifikant beeinflusst. Heutige Fahrerassistenzsysteme bieten mittlerweile die Funktion das Gesamtgewicht sowie die Schwerpunktlage zu ermitteln/schätzen, um den durch die Verschiebung hervorgerufenen Eingriff in die Fahrdynamik z.B. Wechsel von einem untersteuernden Fahrzeug zu einem übersteuernden (teilweise) zu kompensieren¹⁴⁹. Inwieweit Fahrerassistenzsysteme durch eine Ladungsverschiebung beeinflusst werden und ob eine FAS-Regler-bezogene Definition der Grenzwerte $\Delta x_{La,zul}$ $\Delta y_{La,zul}$ für die Verschiebung der Ladung zielführend/sinnvoll ist, bedarf weiterer Untersuchungen.

¹⁴⁶ Vgl. Priddy, J. et al.: Experimental Determination of the Effect of Cargo on Roll Stability, 2005

¹⁴⁷ Bei Anwendung einer gleitenden Verladeweise wie im Bahnverkehr üblich und den damit einhergehenden longitudinalen Verschiebungen, ist die Beeinflussung der Kippstabilität durch eine longitudinale Verschiebung auch für den Straßentransport relevant.

¹⁴⁸ Vgl. Gasser, T. et al.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistentenentwicklung, 2015, S. 47 ff

¹⁴⁹ Vgl. Meywerk, M. et al.: Einfluss der Fahrdynamikregelung auf Fahrzeuge, 2009, S. 40

3.2.3 Impulsaustausch Ladung/Fahrzeug

Neben der Änderung der Fahrzeugeigenschaften durch eine longitudinale und/oder laterale Verschiebung des Ladungsschwerpunktes wirken auch dynamische Effekte bei transienten Fahrmanövern vom Ladegut auf das Transportfahrzeug. Das dynamische Verhalten flüssiger/granularer Ladungstypen und hängender Ladungen (Fleisch) sowie die hierdurch verursachte Beeinflussung der Fahreigenschaften lag bereits im Fokus zahlreicher Forschungsarbeiten^{150,151,152,153}. Das dynamische Verhalten hängt zum einen von dem Systemverhalten (z.B. durch eine Übertragungsfunktion charakterisiert) und dem Eingangssignal, dem zeitlichen Verlauf der wirkenden Beschleunigung, ab¹⁵¹. Bei Flüssigkeiten besteht die Möglichkeit, dass die Systemantwort z.B. bezogen auf die wirkende Kraft auf den Fahrzeugaufbau (Tank) bei transienten Manövern bei einer Erregerfrequenz nahe der natürlichen Eigenfrequenz der Ladung zwei¹⁵¹ bis vier¹⁵² Mal so hoch ausfällt wie bei einem quasistatischen Manöver und dementsprechend die Fahreigenschaften beeinflusst werden. Eine detaillierte Betrachtung der dynamischen Effekte der Ladung auf das Fahrzeug bedarf einer genauen Kenntnis des gesamten Systemverhaltens (Ladung und Fahrzeug). Hierzu werden gekoppelte Simulationsmodelle verwendet: Einem Mehrkörpermodell für die Simulation des Fahrzeugverhaltens und einem entsprechenden Ladungsmodell – in Abhängigkeit der gewünschten Simulationsgenauigkeit bis hin zu Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation für Fluide¹⁵⁴ oder Diskreter Element Methode (DEM) für Schüttgut¹⁵⁵. Eine umfassende Betrachtung des Verhaltens verschiedener Ladungstypen ist aufgrund des Fehlens validierter Modelle zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Arbeit nicht möglich. Zukünftig – bei Vorhandensein entsprechender Modelle für entsprechende Ladungstypen ist eine detaillierte Untersuchung der Wechselwirkungen notwendig, um damit tolerierbare Grenzwerte zu definieren.

Da aktuell in den Regeln der Technik mögliche Ladelücken nicht quantifiziert und die daraus resultierenden Folgen nicht näher beleuchtet werden, wird an dieser Stelle mit vereinfachenden Annahmen anhand des in Abbildung 12 dargestellten Beispiel aufgezeigt, welche Bedeutung diese bei einer formschlüssigen Ladungssicherung von als ideal starr angenommenen Gütern, auf die Fahrstabilität (Kippstabilität) besitzen:

¹⁵⁰ Vgl. Sankar S. et al.: Impact of Dynamic Fluid Slosh Loads on the Directional Response, 1992

¹⁵¹ Vgl. Winkler, C.: Rollover of Heavy Commercial Vehicles, 2000

¹⁵² Vgl. D'Alessandro, V.: Modeling of Tank Vehicle Dynamics, 2011

¹⁵³ Vgl. Romero J.: Modelling of liquid cargo – vehicle interaction during turning manoeuvres, 2007

¹⁵⁴ Vgl. Jafari A. et al.: Roll Dynamic Response of an Articulated Vehicle carrying liquids, 2013

¹⁵⁵ Vgl. Fleissner, F. et al.: Sloshing cargo in silo vehicles, 2009

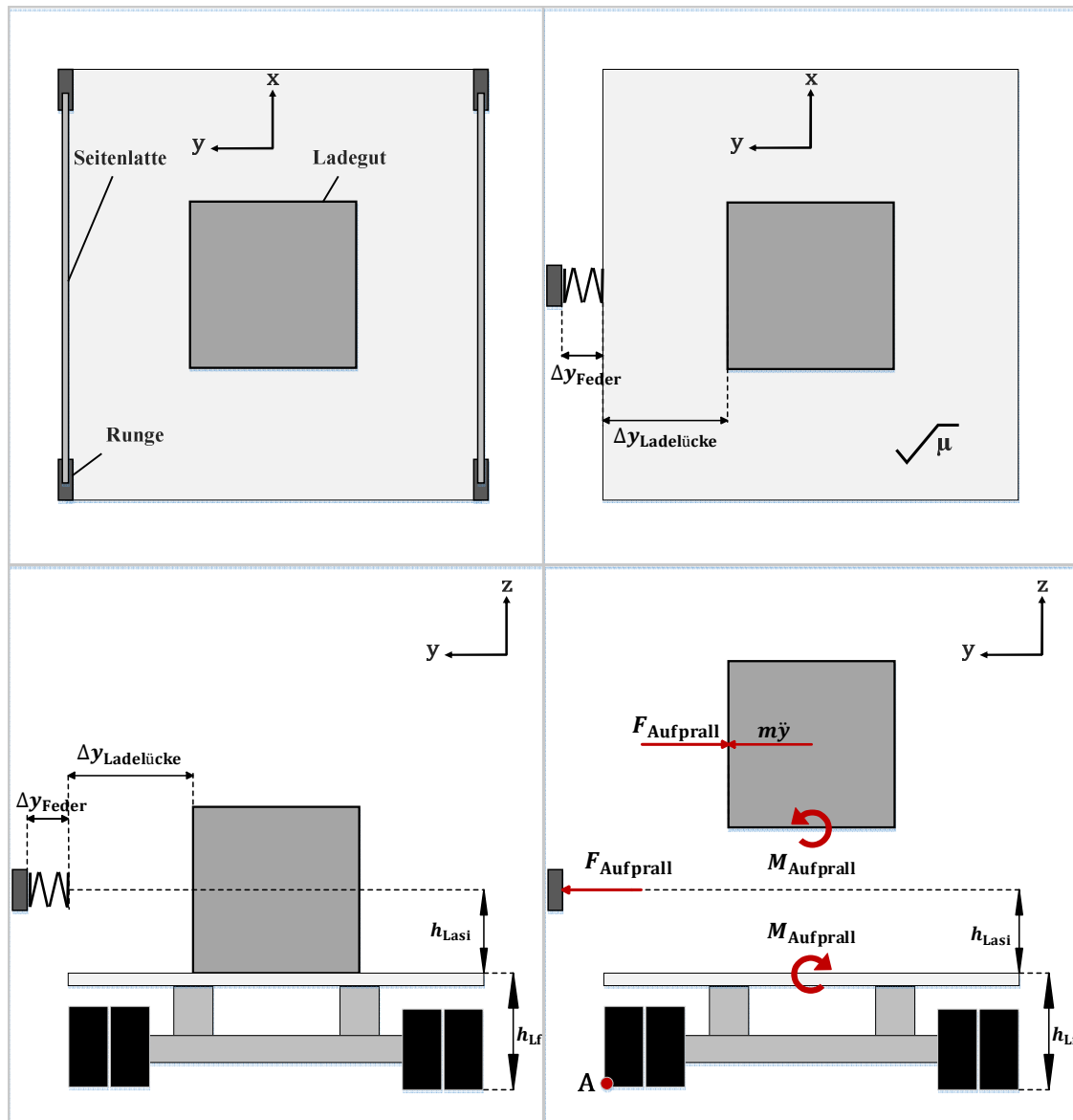


Abbildung 12: Ladung mit Ladelücke – Skizze xy-Ebene (oben links) - mechanisches Ersatzbild (oben rechts) – Skizze yz-Ebene (unten links) – Freikörperbild (unten rechts)

Bei bestehender Ladelücke bewegt sich die Ladung bei einer auftretenden „Massenträgheitskraft“¹⁵⁶, die größer als die wirkende Reibkräfte ist, auf der Ladefläche frei bis diese an die Begrenzung (Laderaumbegrenzung bzw. Sicherungseinrichtung/-hilfsmittel) trifft. Je nach Bewegungsspielraum und resultierender Beschleunigung¹⁵⁷ wird in der Ladung

¹⁵⁶ im technischen Sinne ist der Begriff Kraft nicht korrekt, wird an dieser Stelle aufgrund des üblichen Sprachgebrauchs verwendet

¹⁵⁷ Differenz aus Beschleunigung und Reibwert

kinetische (Bewegungs-)Energie gespeichert¹⁵⁸. Um die Bewegung der Ladung zu stoppen, ist es erforderlich, diese kinetische Energie in die Begrenzung zu übertragen bzw. an/in dieser zu dissipieren.

Unter der Annahme einer konstanten Beschleunigung und einer konstanten Reibung ($\mu = \mu_{\text{gleit}} = \mu_{\text{haft}}$) ist die in der Ladung gespeicherte Energie wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} E_{\text{kin,La}} &= \frac{1}{2} m_{\text{La}} v_{\text{La}}^2 = m_{\text{La}} (\ddot{y}_{\text{La}} - \mu g) \Delta y_{\text{Ladelücke}} \\ &= m_{\text{La}} \ddot{y}_{\text{res}} \Delta y_{\text{Ladelücke}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Bei Vernachlässigung der Energiespeicherung in der Ladung vom Zeitpunkt des Aufpralls bis zum statischen Kräftegleichgewicht von Trägheitskraft $m_{\text{La}} \ddot{y}_{\text{res}}$ und Begrenzungskraft F_{Feder} ergibt sich die Auslenkung der Begrenzung mit zu:

$$\begin{aligned} \Delta y_{\text{Feder}} &= \Delta y_{\text{Feder,stat}} + \Delta y_{\text{Feder,dyn}} \\ &= \frac{m_{\text{La}} \ddot{y}_{\text{res}}}{c_{\text{Feder}}} + \sqrt{\frac{2 E_{\text{kin,La}}}{c_{\text{Feder}}}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Mit $\Delta y_{\text{Feder,dyn}}$ berechnet sich die maximale dynamische Aufprallkraft zu:

$$F_{\text{Aufprall}} = c_{\text{Feder}} \Delta y_{\text{Feder,dyn}} \quad (3.15)$$

Durch Erweiterung des SSF-Kippmodells (vgl. Kap. 3.2.2.2) mit F_{Aufprall} berechnet sich der quasistatische Kippschwellwert zu:

$$SSF_{\text{Ladelücke}} = \frac{\frac{w}{2} \cdot \left(1 - \frac{2}{w} \Delta y_{\text{ges}} \cdot \frac{m_{\text{La}}}{m_{\text{S}}}\right)}{h_{\text{S}}} - \frac{F_{\text{Aufprall}} h_{\text{Lf}}}{m_{\text{ges}} g h_{\text{S}}} \quad (3.16)$$

mit $\Delta y_{\text{ges}} = \Delta y_{\text{Feder}} + \Delta y_{\text{Ladelücke}}$.

In Abbildung 13 sind Werte für $SSF_{\text{Ladelücke}}$ in Abhängigkeit der Ladelücke für verschiedene Federsteifigkeiten des Sicherungselementes aufgeführt. Schon bei einer üblichen und nach dem CTU-Code (VDI 2700 B18¹⁵⁹) zulässigen Ladelücke von 15 cm¹⁶⁰ (8 cm) reduziert sich die maximale Querbeschleunigung eines 12 t-Lkw bei einer resultierenden Ladungsbeschleunigung von 2 m/s², einer Ladungsmasse von 6 t und den üblichen Federsteifigkeiten von Seitenlatten aus Stahl unter Annahme einer gleichmäßigen

¹⁵⁸ im Lkw-Koordinatensystem

¹⁵⁹ Vgl. VDI 2700 Blatt 18 - Entwurf, 2014

¹⁶⁰ Vgl. IMO\ILO\UNECE: CTU Code, 2015, Anlage 7 2.3.6

Belastung der Sicherungselemente um über 40 % (30 %) im Vergleich zu dem Fall ohne Ladelücke.

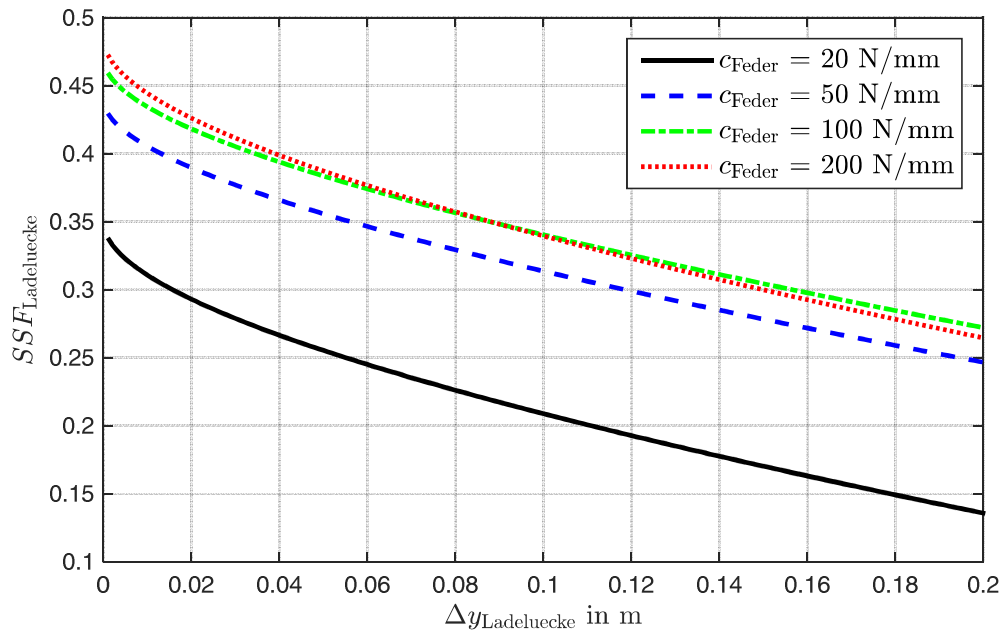


Abbildung 13: Kippneigung eines Lkw in Abhängigkeit der Ladelücke und der Federsteifigkeit des Sicherungselements mit $m_{La} = 6 \text{ t}$, $m_{ges} = 12 \text{ t}$, $w = 2 \text{ m}$, $h_{ges} = 2 \text{ m}$, $h_{lf} = 1 \text{ m}$, $\ddot{y}_{res} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

3.2.3.1 Beeinflussung der mechatronischen Systeme im Fahrzeug

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2.3 erläutert, arbeiten Fahrerassistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene mit parametrisierten Fahrzeugparametern. Sobald das Systemverhalten des Fahrzeugs durch in der Regelung der Assistenzsysteme nicht berücksichtigte dynamischen Effekte verändert wird, ist eine fehlerhafte bzw. eingeschränkte Funktionalität der Assistenzsysteme nicht auszuschließen. Für die Definition von entsprechenden Grenzwerten sind weitere Untersuchungen erforderlich sowie die Kenntnis über die genaue FAS-Reglerstruktur und Parametrierung.

3.2.4 Bewegung der Ladung

Eine Verschiebung des Ladungsschwerpunkts sowie ein Impulsaustausch zwischen Ladung und Fahrzeug über zulässige Werte resultierend aus einer Bewegung der Ladung gefährdet die Betriebssicherheit. Unter Bewegung ist im Folgenden die Bewegung des

Starrkörpers Translation und Rotation sowie die Verformung des Körpers zu verstehen¹⁶¹¹⁶².

3.2.4.1 Translation

Die translatorische Bewegung eines Starrkörpers mit konstanter Masse m ist durch den Schwerpunktsatz gegeben¹⁶³:

$$m\vec{a}_S = \sum \vec{F}_i \quad (3.17)$$

Eine translatorische Bewegung erfolgt, sobald die Kraft der Transportbelastung \vec{F}_{TUL} größer ist als die Kräfte des Sicherungssystems (Sicherungseinrichtungen/-hilfsmittel, Fahrzeugaufbau und die wirkende Reibung) \vec{F}_{LaSi} :

$$\vec{F}_{TUL} > \vec{F}_{LaSi} \quad (3.18)$$

3.2.4.2 Rotation

Die rotatorische Bewegung eines Starrkörpers mit konstanter Masse m ist durch den Drall- bzw. Momentensatz in seiner allgemeinen Form gegeben¹⁶³:

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \dot{\vec{D}} = \frac{d}{dt} \int (\vec{r} \times \vec{v}) dm \\ &= \frac{d}{dt} [(\omega_x \theta_x - \omega_x \theta_{xy} - \omega_z \theta_{xz}) e_x \\ &\quad + (\omega_y \theta_y - \omega_x \theta_{xy} - \omega_z \theta_{yz}) e_y \\ &\quad + (\omega_z \theta_z - \omega_x \theta_{xz} - \omega_y \theta_{yz}) e_z] \end{aligned} \quad (3.19)$$

Im Bereich Ladungssicherung ist eine rein ebene Betrachtung der Bewegung/der Rotation üblich und findet wegen der einfachen Handhabung auch hier Anwendung¹⁶⁴:

¹⁶¹ Flüssige Ladungen stehen nicht im Fokus dieser Arbeit, da ihr Verhalten bzw. die Interaktion mit dem Fahrzeug bereits Thema zahlreicher anderer wissenschaftlicher Arbeiten war und die Ladungssicherung nicht durch den Anwender/Fahrer/Spediteur erfolgt, sondern vielmehr durch die Konstruktion des Tankfahrzeugs gegeben ist.

¹⁶² Im weiteren Verlauf erfolgt die Beschreibung innerhalb des bewegten Lkw-Koordinatensystems. Die durch die Massenträgheit hervorgerufenen Belastungen werden durch \vec{F}_{TUL} berücksichtigt. Eine Berechnung dieser erfolgt durch Aufstellen der Bewegungsgleichungen im Welt-Koordinatensystem bzw. der Ermittlung der Absolutbeschleunigung, bestehend aus Führungs- Coriolis-, und Relativbeschleunigung.

¹⁶³ Vgl. Lackmann, J.: Mechanik, 2005

¹⁶⁴ Betrachtung yz-Ebene

$$\theta_{x,y} \dot{\omega} = M_{x,y,i} \quad (3.20)$$

Eine rotatorische Bewegung erfolgt, sobald das Moment der Transportbelastung $F_{\text{TUL}} \cdot r_{\text{TUL}}$ größer ist als das Moment des Sicherungssystems (Sicherungseinrichtungen/-hilfsmittel, Fahrzeugaufbau und die wirkende Reibung) $F_{\text{LaSi}} \cdot r_{\text{LaSi}}$:

$$F_{\text{TUL}} \cdot r_{\text{TUL}} > F_{\text{LaSi}} \cdot r_{\text{LaSi}} \quad (3.21)$$

3.2.4.3 Verformung

Unter der Einwirkung von äußeren Kräften und Momenten erfahren alle realen Körper, wie Ladegüter, Sicherungsmittel und Fahrzeugaufbauten, Verformungen. Die Verformungen bzw. der Verzerrungszustand wird mit Hilfe des Verzerrungstensors \mathbf{V} beschrieben¹⁶⁵.

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Ladungstypen mit den im Allgemeinen inhomogenen, anisotropen Eigenschaften ist eine in der Praxis anwendbare und verständliche Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Beanspruchung und Verformung schwer möglich. Für einige Ladungstypen sind entsprechende Modelle (z.B. Ladeeinheiten mit Sicherung durch gestretchte Folie bzw. Modellansätze in der Literatur zu finden. Zumindest für eine retrospektive Bewertung eines Ladungssicherungssystems ist eine mathematische Beschreibung nicht erforderlich, da hierbei lediglich die Schwerpunktverschiebung sowie der Impuls-/Kraftübertragung relevant ist (vgl. Abbildung 8). Beide Größen lassen sich mit Hilfe praktischer Versuchen und entsprechender Messtechnik ermitteln.

Relevante Effekte, die durch Ladungsverformung hervorgerufen werden, sind unter anderem:

- Das Setzen der Ladung¹⁶⁶, bei dem Volumenanteile der Ladung in weniger belastete Bereiche ausweichen. Dies geht einher mit gleichzeitig ablaufenden Verdichtungsverfahren. Je nach Steifigkeit des Sicherungsmittels (Zurrgurt) und Ausprägung des Setzvorgangs besteht bei Niederzurrungen die Möglichkeit eines vollständigen Verlustes der sichernden Wirkung.
- Je nach Verformungsfähigkeit der Ladung und des wirkenden Sicherungsmittels, wird die Ladung in unterschiedlichen Arealen abgestützt. Bei z.B. einer formschlüssigen Sicherung durch eine Seitenlatte. Hierdurch wird die Beanspruchung der Seitenlatte sowie die Sicherungswirkung beeinflusst (vgl. Kapitel 3.25).

¹⁶⁵ Vgl. Lackmann, J.: Mechanik, 2005

¹⁶⁶ Vgl. Biermann, N.: Berechnungsansatz zur Auslegung von Kunststofffolien, 2007

- Die auftretende Kraftüberhöhung in beispielsweise einem mit Flüssigkeit teilgefüllten IBC (Intermediate Bulk Container) (vgl. Slosh-Effekt in Tankfahrzeugen in Kapitel 3.2.3)
- Die Reduktion der Aufprallenergie durch interne dissipative Effekte (z.B. Reibung) und/oder interne Bewegungsumlenkung (siehe z.B. Aufprall von FIBC)¹⁶⁷.

3.2.5 Potenzial der Sicherungsmaßnahmen

Die Wirkung der Sicherungsmaßnahmen ist je nach Systemausprägung sowie je nach zur sichernden Bewegungsform von unterschiedlichen Faktoren abhängig, die allerdings zusätzlich vom Systemzustand abhängig sind¹⁶⁸. Anhand des Sicherungspotenzials einer formschlüssigen Sicherung durch eine Seitenlatte wird dieser Sachverhalt im weiteren Verlauf veranschaulicht.

Betrachtet werden ein Sperrbalken sowie eine Seitenlatte unter der der Belastung durch zwei symmetrisch mit dem Abstand b angreifenden Einzellasten (entspricht der Belastung durch einen idealen Starrkörper) bzw. eine zur Mitte symmetrisch liegende Streckenlast mit der Länge b (entspricht näherungsweise¹⁶⁹ einer Belastung durch einen Luftsack¹⁷⁰)(vgl. Abbildung 14).

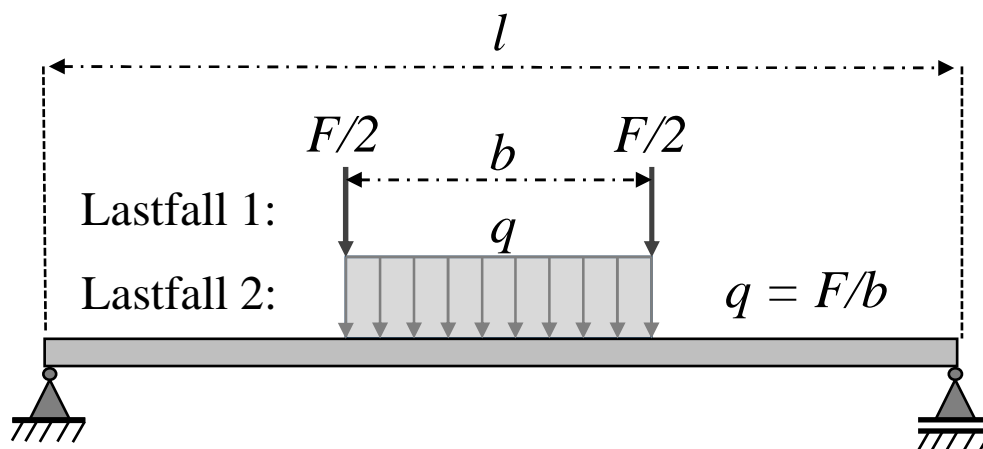


Abbildung 14: Mechanisches Ersatzbild für die Seitenlatte/Sperrbalken für zwei verschiedene Lastfälle

¹⁶⁷ Vgl. Kaltenborn, S.: Festigkeitsuntersuchungen an flexiblen Schüttgutbehältern, 2006

¹⁶⁸ In den anerkannten Regeln der Technik wird jegliche Änderung des Systemzustandes vernachlässigt (vgl. Kap 2)

¹⁶⁹ Die bei Verformung auftretenden Querkräfte werden vernachlässigt

¹⁷⁰ Prüfbedingungen/-mittel für den Lkw-Aufbau nach DIN EN 12642

Abbildung 15 zeigt die auf eine über die ganze Länge aufgebrachte Streckenlast (10 kN) bezogene Beanspruchbarkeit der Sicherungselemente. Dies entspricht der durch Sicherungsmittelproduzenten angegebenen *Blocking Capacity* $BC^{171\ 172}$. Die Beanspruchbarkeit beträgt bei einer Punktbelastung ($b = 0$ für Einzellast bzw. Streckenlast) lediglich 50 % der *Blocking Capacity*. Die Beanspruchbarkeit steigt progressiv mit der dem Abstand/der Länge b . Bei einer Belastung durch einen idealen Starrkörper ist die BC gewährleistet, sobald für die Breite des Starrkörpers $b \geq 0,5 l$ gilt. Bei weiterer Steigerung der Breite ist das Sicherungselement deutlich höher beanspruchbar.

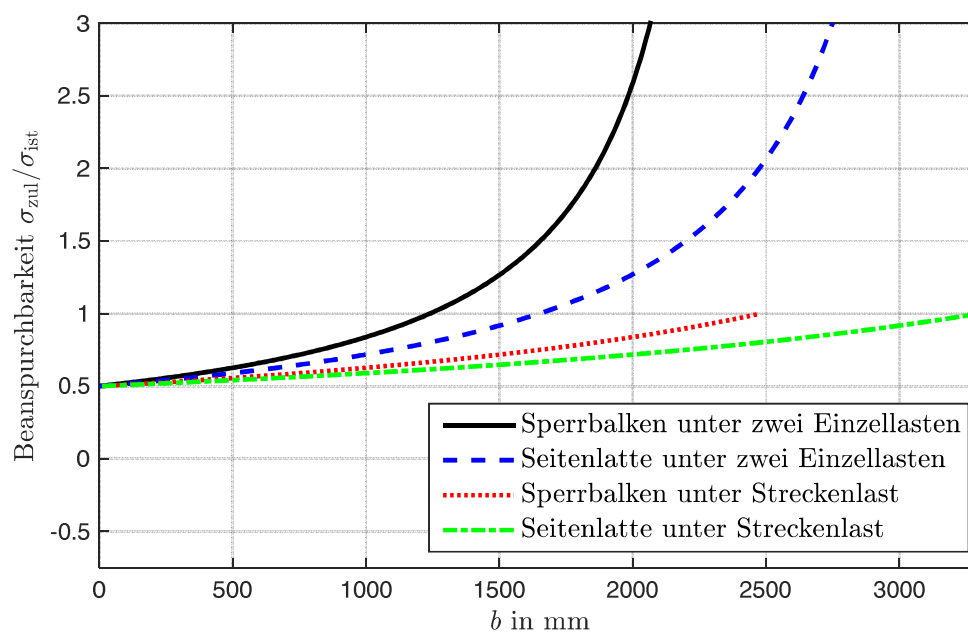


Abbildung 15: Eine auf eine über die ganze Länge verteilte Streckenlast bezogene Beanspruchbarkeit von formschlüssigen Sicherungselementen für zwei mit dem Abstand b angreifende Einzellasten sowie eine Streckenlast mit der Länge b

Sobald die Ladung nicht direkt an dem Sicherungselement anliegt – somit eine Ladelücke besteht – und die Trägheitskräfte größer als die Reibkräfte sind, kommt die Ladung in Bewegung und speichert kinetische Energie. Um eine weitere Verschiebung der Ladung zu unterbinden, besteht die Notwendigkeit einer Energieumwandlung bzw. einer Energieübertragung. Hierfür werden Sicherungselemente eingesetzt (vgl. 3.2.3). Dieser notwendige Energieübertrag ruft eine dynamische Kraftüberhöhung hervor. Bei Vernachlässigung

¹⁷¹ Vgl. allsafe Produktkatalog/-informationen

¹⁷² Vgl. SpanSet: Produktkatalog Ladungssicherung, S. 78

der schädigenden Wirkung durch die stoßartige Belastung¹⁷³ reduziert sich die Beanspruchbarkeit des Sicherungselementes aufgrund der Kraftübertragung. Die Kraftüberhöhung wird anhand der Formel (3.14) berechnet. In Abbildung 16 ist die Beanspruchbarkeit eines Sperrbalkens ($BC = 10 \text{ kN}$) für verschiedene Ladelücken einer ideal starren Ladung (zwei Einzellasten) mit einer Ladungsmasse von $m_{La} = 2000 \text{ kg}$ und einer resultierenden Ladegutbeschleunigung von 5 m/s^2 aufgetragen. Schon bei sehr kleinen Ladelücken ($\leq 10 \text{ mm}$) ist die Beanspruchbarkeit des Sicherungselementes erheblich reduziert. Dennoch ist nach dem aktuellen CTU-Code eine Ladelücke von 15 cm zulässig¹⁷⁴.

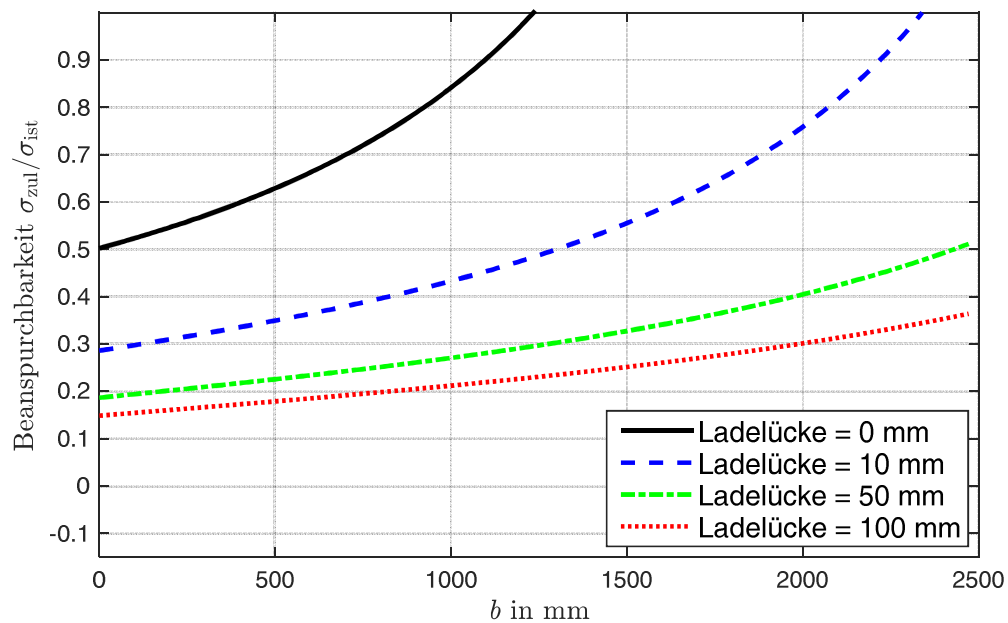


Abbildung 16: Auf eine über die ganze Länge verteilte Streckenlast bezogene Beanspruchbarkeit von einem Sperrbalken für zwei mit dem Abstand b angreifende Einzellasten bei verschiedenen Ladelücken, einer Ladungsmasse von 2000 kg und einer resultierenden Ladegutbeschleunigung von 5 m/s^2

Ähnlich wie die Beanspruchbarkeit verhält sich die durch die Lastangriffspunkte definierte Federsteifigkeit des Sicherungsmittels. Hierbei gilt zu beachten, dass sich die für die Berechnung der Federsteifigkeit herangezogene Verformung bei den Einzellasten von der Streckenlast unterscheidet:

- Zwei Einzellasten: Federsteifigkeit wurde mit Hilfe der Durchbiegung an der Stelle a , dem Angriffspunkt der ersten Kraft berechnet. Dies entspricht der Verschiebung einer ideal starren Ladung.

¹⁷³ Vgl. Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente, 2011, S. 49

¹⁷⁴ Vgl. IMO\ILO\UNECE: CTU Code, 2015, Anlage 7 2.3.6

- Streckenlast: Federsteifigkeit wurde für die über die Strecke b gemittelte Durchbiegung berechnet.

Wie bei der Beanspruchbarkeit steigt die Federsteifigkeit progressiv¹⁷⁵ mit dem Abstand/der Länge b an. Demnach wird die Verschiebung der Ladung durch Steifigkeit der Ladung selbst, sowie durch den oder die Kraftangriffspunkt/e am Sicherungsmittel bestimmt. Des Weiteren ist durch einen Vergleich der Verläufe des Sperrbalkens mit denen der Seitenlatte in Abbildung 17 zu erkennen, dass, obwohl in longitudinaler Richtung eine größere Verschiebung als lateral zulässig ist, aufgrund der geometrischen Verhältnisse eine deutlich höhere Federsteifigkeit vorliegt.

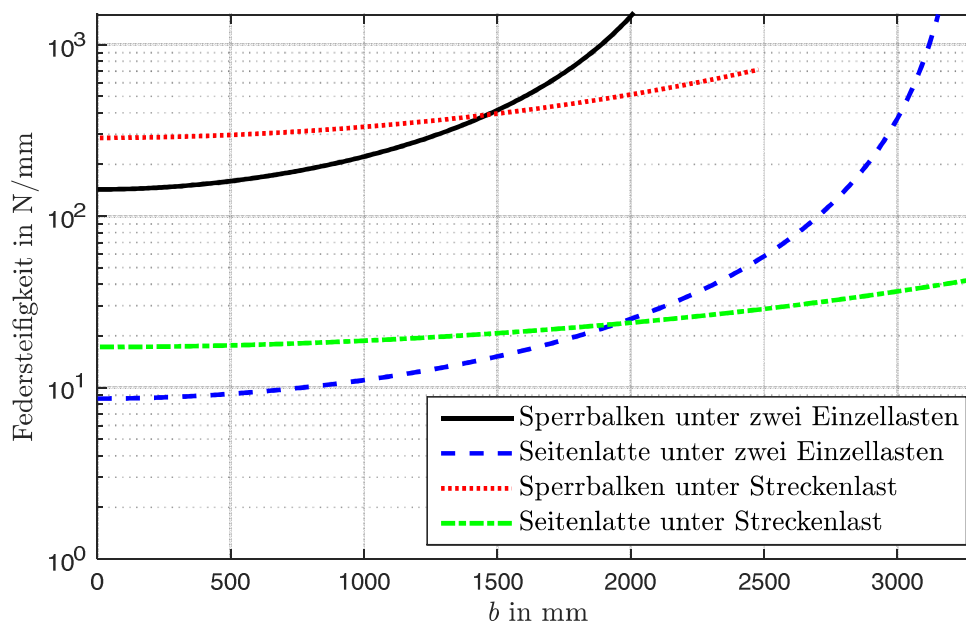


Abbildung 17: Federsteifigkeiten von formschlüssigen Sicherungselementen ($BC = 10 \text{ kN}$) für zwei mit dem Abstand b angreifende Einzellasten sowie eine Streckenlast mit der Länge b

Dem Umstand der variablen Beanspruchbarkeit sowie Federsteifigkeit wird momentan weder im anerkannten Stand der Technik zur Berechnung der erforderlichen Sicherungsmittel noch in den nicht beschlossenen Zertifizierungsrichtlinien für formschlüssige Sicherungselemente Beachtung geschenkt. Unter ungünstigen Umständen, beispielsweise einer Punktelastung durch ein Ladegut bei Vorhandensein einer Ladelücke, besteht die Möglichkeit eines falschen Sicherheitsbewusstseins beim Anwender bzw. einer hierdurch verursachten Gefährdung der Betriebssicherheit.

¹⁷⁵ Wegen der zweifachen Integration vom Momentenverlauf zum Biegeverlauf ist die Federsteifigkeit eine Funktion höheren Grades und somit progressiver

3.3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Gegenstand dieses Kapitels ist die Ermittlung der Anforderungen an Ladungssicherungssystemen. Hierzu werden die relevanten Ursachen, die zu einer Nichterfüllung der grundlegenden Forderungen, eines beförderungs- und betriebssicheren Transportes, werden mittels zweier Fehlerbäume aufgezeigt und Präventivmaßnahmen soweit möglich formuliert.

Eine allgemeingültige Definition einer Beförderungssicherheit ist gegeben, sobald die Beanspruchbarkeit der Ladung BE_{La} kleiner als die Beanspruchungen durch den Transport (Umschlag/Lagerung) X_{TUL} ist. Eine allgemeine Definition technischer Grenzwerten ist von verschiedenen Faktoren abhängig und aufgrund der Vielfalt der möglichen Ladegüter, mit unterschiedlichsten Schadensdefinition – je nach Anforderungsprofil allgemein nicht möglich. Hierzu bedarf es zukünftig konkreter Angaben des Herstellers/Kunden, retrospektiver Schadensanalysen für jedes Ladegut bzw. Ladegutklassen¹⁷⁶ oder Normen/Richtlinien für bestimmte Ladegutklassen.

Eine Definition von Grenzwerten hinsichtlich einer Einhaltung der Betriebssicherheit ist hingegen, zumindest bei ausreichender Kenntnis über die die relevanten Fahrzeugeigenschaften und des Ladungssicherungssystemverhalten, je nach Modellierungsgüte, möglich. Allgemein ist festzuhalten, dass für die Betriebssicherheit nicht, wie in der StVO §22 vorgeschrieben, eine absolute Fixierung der Ladung anzustreben bzw. praktisch möglich ist, sondern die Einhaltung bestimmter Grenzwerte für die Verschiebung des Ladungsschwerpunktes sowie einen unzulässigen Impuls-/Kraftaustausch zwischen Ladung und Fahrzeug hinreichend ist. Hierbei sind jedoch die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Ladungssicherungssystem und Transportbelastungen zu beachten. Zum Beispiel erreicht ein Teilbeladenes Fahrzeug mit niedrigem Schwerpunkt höhere maximale Querschleunigungen und demnach eine höhere maximale laterale Transportbelastung als ein voll beladenes Fahrzeug (vgl. Formel (3.8)).

Wie relevant diese Wechselwirkungen in der Praxis für die Definition von Grenzwerten bzw. für die Auslegung von Ladungssicherungssystemen ist, gilt es zukünftig zu untersuchen. Diese Untersuchung sowie die weitere Definition von Grenzwerten erfordern allerdings zunächst valide Modelle für das Verhalten von Ladungssicherungssystemen sowie der Fahrdynamik des Transportfahrzeugs.

Ferner ist aufgrund der Vielfalt der unterschiedlichen Transportfahrzeuge und deren unterschiedlichen fahrdynamischen Eigenschaften und somit auch unterschiedlichen Trans-

¹⁷⁶ Eine vollständige Klassifizierung aller möglichen Ladegüter ist dem Verfasser dieser Dissertation nicht bekannt und bedarf demnach auch weiterer Untersuchungen

portbelastungen zu untersuchen, ob bei genauer Kenntnis des Verhaltens der Ladungssicherungssystems eine Dimensionierung der Sicherungsmaßnahmen nicht an die des Fahrzeugs anzupassen ist.

4 Lastfälle

4.1 Einführung

Während eines Transportvorgangs wirken neben mechanisch-dynamischen Transportbelastungen auch weitere¹⁷⁷ Transportbelastungen auf das Ladungssicherungssystem. Die letztgenannten werden in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet (vgl. 4.2.6), da diese im Bereich der Verpackungsforschung bzw. der Materialkunde liegen und der Fokus des zu entwickelnden Prüfverfahrens auf der Reproduktion der relevanten, aus der Fahrdynamik des Transportfahrzeug resultierenden mechanischen Transportbelastungen liegt.

Diese mechanischen Transportbelastungen resultieren nach DIN 30786-1¹⁷⁸ zum einen aus Beschleunigungen aus Fahrmanövern (z.B. Bremsmanöver, Kurvenfahrt, etc.) und zum anderen aus den ständig auftretenden Beschleunigungen, hervorgerufen durch das Überfahren von Unebenheiten (externe Fahrzeuganregung) und Schwingungen innerhalb des Fahrzeugs (z.B. Motor).

Mit diesen beiden Beschleunigungsarten gehen jedoch auch Drehbewegungen des Fahrzeugaufbaus (Nicken und Wanken) einher. Durch die Drehbewegung werden den aus den Fahrmanövern stammenden translatorischen Beschleunigung zusätzlich Radial- und Transversalbeschleunigungen überlagert. Ferner wirkt durch den Winkel der Ladefläche zur Normalebene anteilig die Erdbeschleunigung. Dieser Aspekt wird im Folgenden anhand einer Kurvenfahrt eines Lkw aufgezeigt:

¹⁷⁷ Nach DIN 30786-1: Temperatur und Luftfeuchte, Umgebungsdruck, Niederschlag, Strahlung, Luftströmung, biologische Belastungen, chemische Belastungen, akustische Belastungen

¹⁷⁸ Vgl. DIN 30786-1

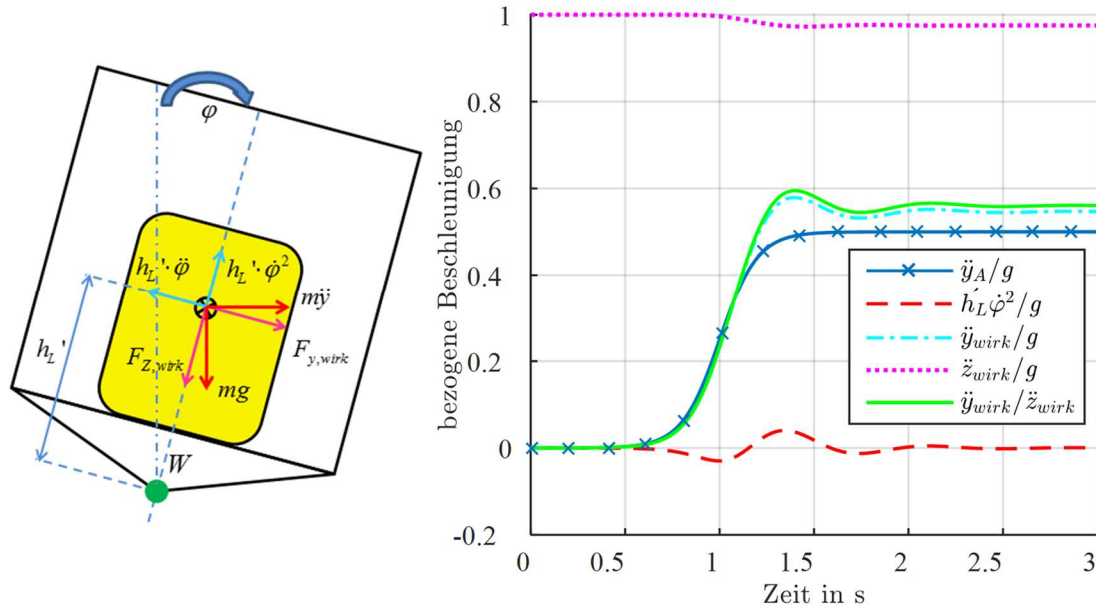


Abbildung 18: Auf die Ladung wirkende Beschleunigung bei einer Kurvenfahrt (simuliert): Beschleunigung des Fahrzeugaufbaus \ddot{y}_A , Radialbeschleunigung $h'_L \dot{\varphi}^2$, auf die Ladung wirkende Beschleunigung \ddot{y}_{wirk} , auf die Ladung wirkende vertikale Beschleunigung \ddot{z}_{wirk} , Transversalbeschleunigung $h'_L \dot{\varphi}$ ist wegen geringer Relevanz nicht dargestellt.¹⁷⁹

Die im Fahrzeugkoordinatensystem auf die Ladung wirkenden Beschleunigungen¹⁸⁰ während einer Kurvenfahrt ergeben sich mit dem Abstand des Ladungsschwerpunktes zum Momentanpol (Wankzentrums) des Aufbaus h'_L , dem Wankwinkel φ und einem vorgegebenen Beschleunigungsverlauf einer Kurveneinfahrt \ddot{y}_A zu:

$$\ddot{y}_{wirk} = \ddot{y}_A \cos \varphi - h'_L \ddot{\varphi} + \sin \varphi \cdot g \quad (4.1)$$

$$\ddot{z}_{wirk} = g \cos \varphi - h'_L \dot{\varphi}^2 - \ddot{y}_A \sin \varphi \quad (4.2)$$

Damit haben die durch die Drehbewegung hervorgerufenen Beschleunigungen jeweils eine Ladungsbewegung induzierenden (horizontalen Ebene im Ladungskkoordinatensystem) und einen Reibkraft vermindernenden Anteil (z-Achse im Ladungskkoordinatensystem). Mit einem zweidimensionalen, mit Literaturdaten¹⁸¹ parametrisierten Wankmodell und einem, durch eine Hyperbelfunktion approximierten Beschleunigungsverlauf einer

¹⁷⁹ Klonecki, K.: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung von Lasi, 2014

¹⁸⁰ Die durch die Überfahrt von Unebenheiten und im Fahrzeug hervorgerufenen Schwingungen werden der Einfachheit halber für dieses Beispiel vernachlässigt.

¹⁸¹ Vgl. Frey, C. et al.: Einsatz von Retardern in der Betriebsbremsanlage von Lastzügen, 1993

Kurvenfahrt (maximal Wert von $4,91 \text{ m/s}^2$) wird folgendes berechnet: Die auf die wirkende vertikale Beschleunigung der Ladung bezogene laterale Beschleunigung $\ddot{y}_{\text{wirk}}/\ddot{z}_{\text{wirk}}$ beträgt 0,59 (vgl. Abbildung 18). Damit ist sie im Vergleich zur Beschleunigung des Fahrzeugs (im Wankzentrum) um 18% überhöht. Diese von den Fahrzeugeigenschaften, der Position der Ladung sowie vom Fahrmanöver abhängige Überhöhung ist somit für die Bewertung von Ladungssicherungssystemen nicht vernachlässigbar.

Bei Außerachtlassung der oben beschriebenen Drehbeschleunigungen treten die Beschleunigungen¹⁸² aus Fahrmanövern in der horizontalen Ebene (x- und y-Achse) auf, während die ständig auftretenden Beschleunigungen überwiegend in vertikaler Richtung (z-Achse) wirken. Die beim Überfahren von Unebenheiten entstehenden Beschleunigungen in horizontaler Richtung sowie die intern angeregten Fahrzeugbeschleunigungen werden in dieser Arbeit aus den folgenden Gründen vernachlässigt:

- Die Gesamtsignalleistung des Signals (RMS) ist deutlich schwächer ausgeprägt als vertikal und wird daher auch im Verpackungstest vernachlässigt^{183 184}.
- Es wird angenommen, dass eine Einführung eines Sicherheitsbeiwertes bei der Darstellung der verbliebenen Beschleunigungsanteile den Effekt kompensieren kann.
- Die Dauerhaltbarkeit des Ladungssicherungssystems liegt nicht im Fokus der Untersuchung und wird vernachlässigt.

Um die Schädigungswirkung der lateralen Schwingungsanteile auf das Ladungssicherungssystem und den Einfluss auf den Reibwert zwischen Ladung und Transportfahrzeug sowie zwischen den einzelnen Ladungssichten zu ermitteln, sind zukünftig weitere Untersuchungen erforderlich.

4.2 Dekomposition der Transportbelastungen

Je nach Fahrmanöver, Fahrzeug und Ladung unterscheiden sich die Beschleunigungsverläufe: In Abbildung 19 sind die Beschleunigungsverläufe des Fahrzeugschwerpunktes im fahrzeugeigenen Koordinatensystem für einen 7,5 t-Lkw sowie für einen Sattelzug bei einem Bremsmanöver, eine Kurvenfahrt und ein Ausweichmanöver nach DIN 12642 dargestellt.

¹⁸² im fahrzeugfesten Koordinatensystem

¹⁸³ Vgl. Shires, D.: Methodologies for Vibration Testing Packaged-Products, 2014, S. 1

¹⁸⁴ Vgl. Bernad, C. et al.: Transport Vibration Laboratory Simulation, 2011, S. 6

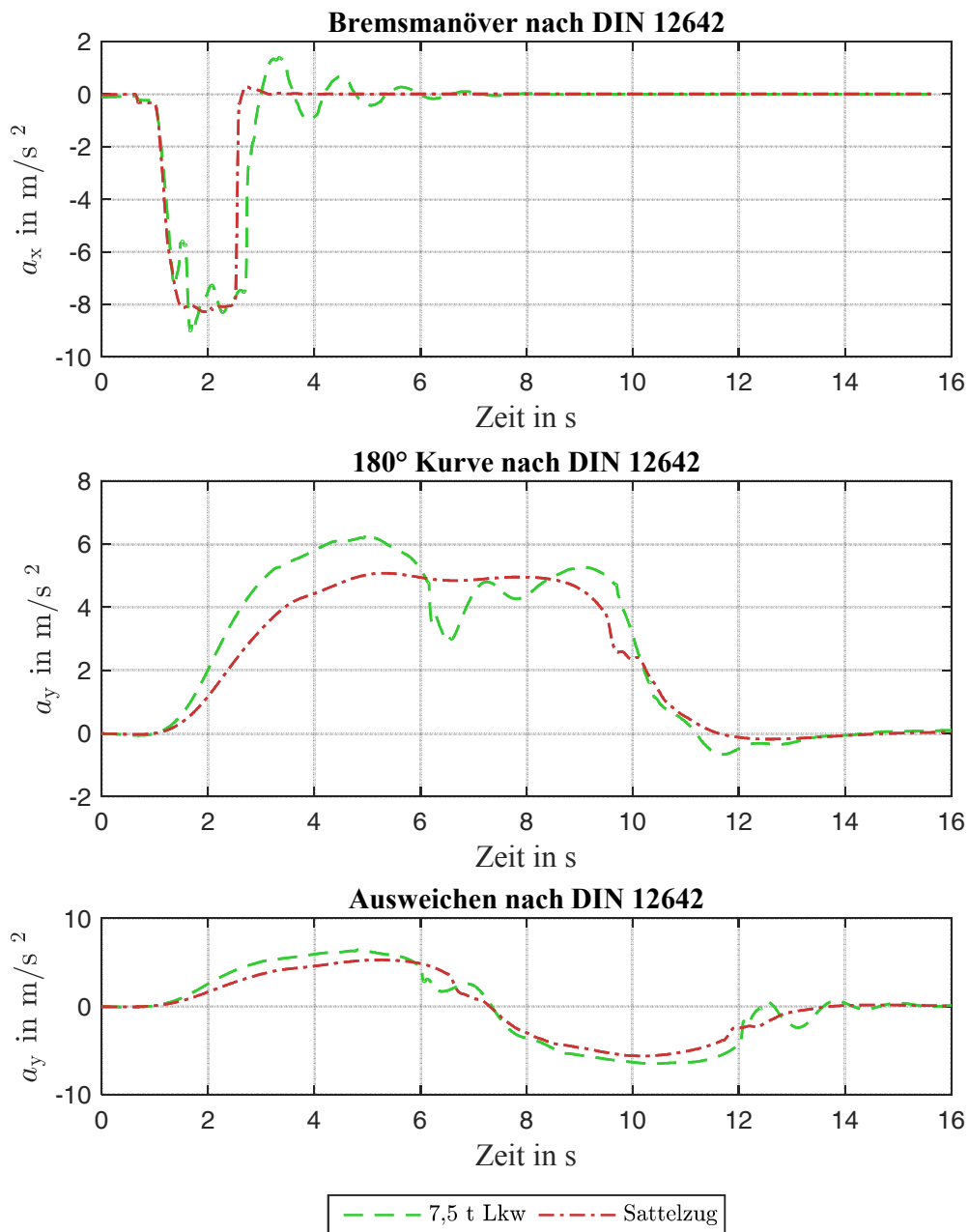


Abbildung 19: Gegenüberstellung von simulierten Beschleunigungsverläufen der Fahrzeugschwerpunkte eines 7,5 t Lkw und eines Sattelzugs im fahrzeugeigenem Koordinatensystem für verschiedene Fahrmanöver nach DIN 12642 (synchrone Darstellung)

Die horizontalen Kurvenverläufe unterscheiden sich in folgenden Aspekten:

- Horizontale Richtung (longitudinal oder lateral)
- Amplitude inkl. der Überhöhung durch Drehbewegungen (nicht explizit dargestellt)
- Dauer
- Gradient bzw. Schwellzeit der Beschleunigung
- Anzahl der Beschleunigungsrichtungswechsel

Diese Belastungsparameter werden in den folgenden Unterabschnitten tiefergehend analysiert und soweit möglich für den Straßentransport quantifiziert. Da ein Transport nicht nur ein Fahrmanöver beinhaltet, besteht die Notwendigkeit für die Überprüfung von Worst-Case-Szenarien auch die relevante Vorgeschichte des Ladungssicherungssystems miteinzubeziehen. Daher werden die oben genannten Parameter ergänzt durch

- die Häufigkeit der Belastung (Anzahl der Durchgänge) sowie
- die Vorkonditionierung der Ladung.

Auch die ständig auftretenden Beschleunigungen (Vibrationen) unterscheiden sich in ihrer grundlegenden Charakteristik.

- Signalart: periodisch, stochastisch
- Stationariät
- RMS-Wert
- Kurtosis

Aufgrund der Verständlichkeit werden diese Unterscheidungsmerkmale separat in einem gemeinsamen Unterabschnitt behandelt und soweit möglich quantifiziert.

4.2.1 Richtung und Amplitudenhöhe

Bei der Sicherung von Ladung wird in longitudinale Sicherung nach vorne und hinten sowie laterale Sicherung unterschieden. Diese Unterscheidung ergibt sich zum einen aus der Gestaltung des Lkw-Aufbaus¹⁸⁵ und zum anderen aus den zu erwartenden Transportbelastungen. Die longitudinale Beschleunigung wird begrenzt über den Kraftschluss zwischen den Reifen bzw. durch das vom Motor oder von der Bremsanlage an die Räder

¹⁸⁵ Beim Curtainsider beispielsweise kann die Sicherung nach vorne über die Stirnwand erfolgen, während zur Seite die Notwendigkeit weiterer Sicherungsmaßnahmen besteht, wenn nur eine Wetterschutzplane vorhanden ist.

übertragene Antriebs-/Bremsmoment¹⁸⁶. Die lateral mögliche Beschleunigung wird hingegen bei Nutzfahrzeugen hauptsächlich durch die Kippneigung begrenzt (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Für die Sicherung der Ladung entgegen den Trägheitskräften in lateraler und longitudinaler Fahrzeugrichtung werden aufgrund der Unterschiede in der zu erwartenden Amplitudenhöhe der Beschleunigung sowie durch Gestaltung des Fahrzeugaufbaus teilweise unterschiedliche Hilfsmittel und Einrichtungen zur Ladungssicherung verwendet. Dementsprechend ist die Beschleunigungsrichtung auch bei der Evaluation der Ladungssicherungssysteme zu beachten.

4.2.1.1 Longitudinale Transportbelastung

In den aktuellen internationalen Normen/Richtlinien^{187 188} wird bei Lkw eine longitudinale Sicherung gegen eine Belastung von $7,85 \text{ m/s}^2$ vorgeschrieben, um den Worst-Case-Fall abzudecken¹⁸⁹. Bei Fahrversuchen der DEKRA konnten allerdings Werte von über $9,32 \text{ m/s}^2$ erreicht werden¹⁹⁰. In Abhängigkeit der Art des Transportfahrzeuges, des Fahrzeugzustandes und des gegebenen Reibwerts zwischen Fahrbahn und Reifen sind auch höhere Werte theoretisch möglich. Demnach ist mit $7,85 \text{ m/s}^2$ der Worst-Case-Fall für alle Transportfahrzeuge nicht abgedeckt. Allerdings beträgt die gesetzliche Mindestverzögerung von Lkw lediglich 5 m/s^2 ¹⁹¹, wobei jedoch nach Podzuweit¹⁹² ein „durchschnittliches“ Nutzfahrzeug im vollbeladenen Zustand Verzögerungswerte von $6,5 \text{ m/s}^2$ erreicht. Die Festlegung eines statistisch abgesicherten, in Relation zum Aufwand ausreichenden Grenzwerts obliegt letztendlich dem Gesetzgeber bzw. den Fachgremien. Für eine Worst-Case-Absicherung und die Auslegung des zu entwickelnden Prüfverfahrens wird in dieser

¹⁸⁶ Die Beschleunigungsphase wird wegen der im Vergleich zur Bremsverzögerung geringeren Amplitudenhöhe (nach DIN 12195-1:2010 0,8 g beim Bremsen und 0,5 g beim Beschleunigen) in dieser Arbeit nicht weiter beachtet. Die Ergebnisse sind übertragbar.

¹⁸⁷ Vgl. DIN EN 12195-1, 2010

¹⁸⁸ Vgl. NTC Australia: Load Restraint Guide, 2004

¹⁸⁹ Vgl. Berg, A. et al.: Investigation of cargo safety, 2002, S. 9 ff

¹⁹⁰ Vgl. Wulhorst, K. et al.: Vergleich der Berechnungsmethoden, 2013 S. 36

¹⁹¹ Vgl. StVZO §41, 2012

¹⁹² Vgl. Podzuweit, U. et al.: Ladungssicherung, 2012, S. 157

Arbeit ein Wert von $9,81 \text{ m/s}^2$ angenommen, der auch in einigen anderen (teilweise früheren Ausgaben) der Ladungssicherungsrichtlinien Einzug gefunden hat^{193,194,195}.

4.2.1.2 Laterale Transportbelastung

In den aktuellen internationalen Normen/Richtlinien^{196 197} wird bei Lkw eine laterale Sicherung gegen $4,91 \text{ m/s}^2$ vorgeschrieben, um den Worst-Case-Fall abzudecken¹⁹⁸. Für kippgefährdete Güter ist mit einer lateralen Beschleunigung von $5,86 \text{ m/s}^2$ ^{199,200} bzw. $6,87 \text{ m/s}^2$ ²⁰¹ zu rechnen, im praktischen Fahrversuch allerdings nicht zu prüfen. Wie bereits in den Abschnitten 2.3.2.1 und 3.2.2.2 aufgeführt, ist die maximale laterale Beschleunigung von vielen Parametern des Fahrzeugs inklusive der Ladung abhängig. Der Wert von $4,91 \text{ m/s}^2$ überschreitet die fahrdynamischen Möglichkeiten der meisten Transportfahrzeuge, allerdings belegen Simulationsergebnisse (siehe Abbildung 20 und Anhang A.3) sowie Versuche der DEKRA²⁰², dass auch Beschleunigungen bis $6,87 \text{ m/s}^2$ bei einigen Lkw möglich sind. Hierbei ist allerdings die bereits überlagerte Drehbewegung des Lkw-Aufbaus zu beachten. So beträgt beispielsweise bei dem nach DIN 12642 simulierten Ausweichmanöver mit einem „üblichen“ 7,5 t Lkw die in lateraler Richtung anteilig wirkende Erdbeschleunigung $1,53 \text{ m/s}^2$ ²⁰³. Die Festlegung eines statistisch abgesicherten, in Relation zum Aufwand ausreichenden Grenzwerts obliegt letztendlich auch hier dem Gesetzgeber bzw. den Fachgremien. Für eine Worst-Case-Absicherung wird hier im Weiteren ein Wert von $6,87 \text{ m/s}^2$ ohne Darstellung der Drehbewegung und einen Wert von $5,86 \text{ m/s}^2$ mit Darstellung der Drehbewegung angenommen.

¹⁹³ Vgl. IMO\ILO\UNECE: CTU Code, 1997

¹⁹⁴ Vgl. Department of Transport: Code of Practice – Safety of Loads on Vehicles, 2002, S. 15

¹⁹⁵ Vgl. European Commission: European Best Practice Guidelines on Cargo Securing, 2002, S. 11

¹⁹⁶ Vgl. DIN EN 12195-1, 2010

¹⁹⁷ Vgl. NTC Australia: Load Restraint Guide, 2004

¹⁹⁸ Vgl. Berg, A. et al.: Investigation of cargo safety, 2002, S. 9 ff

¹⁹⁹ Vgl. VDI 2700 Blatt 2; 2014, S. 13

²⁰⁰ Vgl. DIN EN 12195-1; 2010, S. 12

²⁰¹ Vgl. DIN EN 12195-1, 2003, S. 12

²⁰² Vgl. Berg, A. et al.: Investigation of cargo safety, 2002, S. 9 ff

²⁰³ Der Anteil der Beschleunigung aus der Winkelbeschleunigung mit $0,1 \text{ m/s}^2$ ist vernachlässigbar

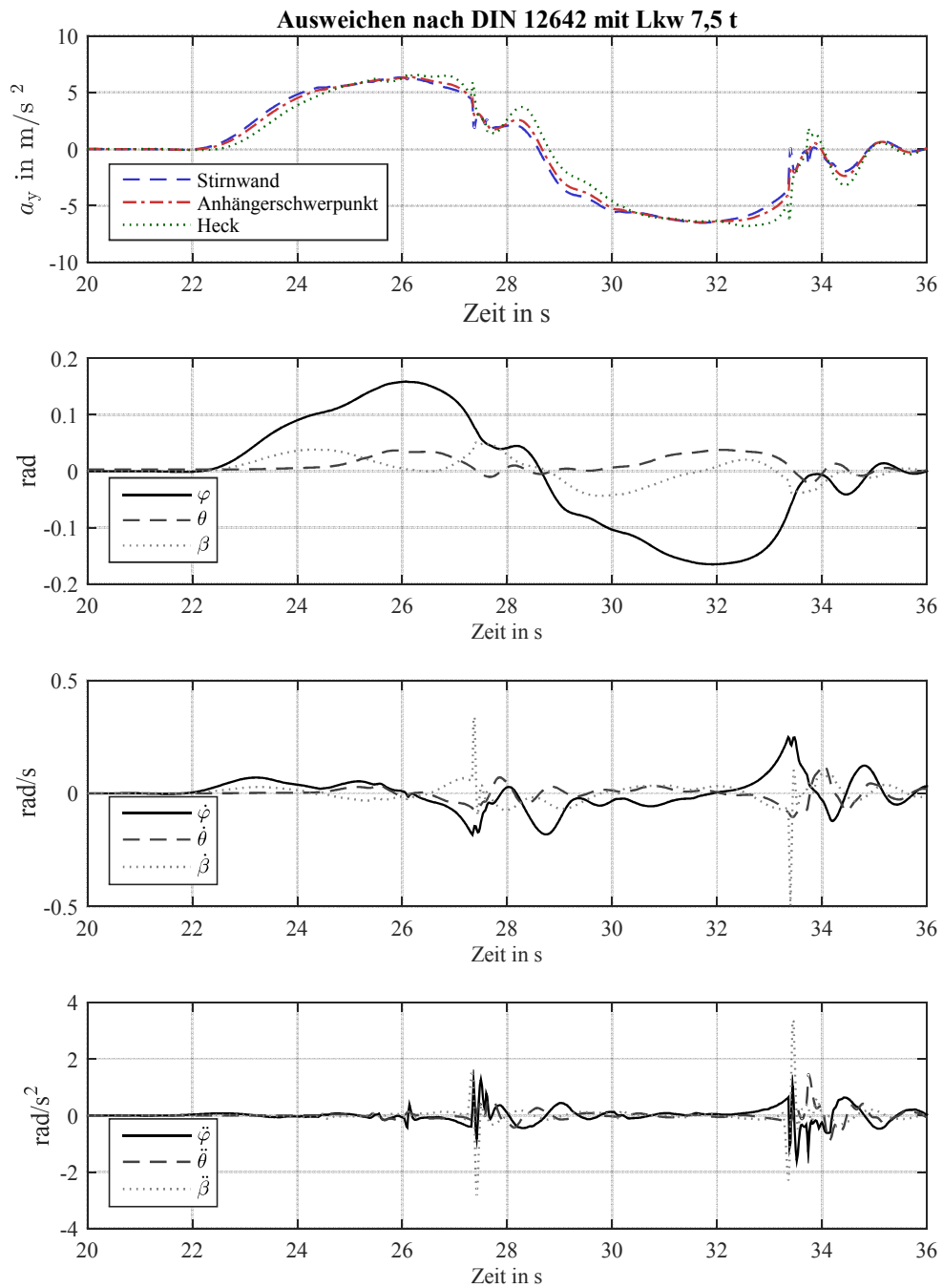


Abbildung 20: Simulationsergebnisse für ein Ausweichmanöver nach DIN 12642 mit einem 7,5 t Lkw (Simulationsparameter sind im Anhang aufgeführt)

4.2.1.3 Drehbewegung

Wie bereits am Anfang des Kapitels beschrieben, resultieren bei einem gefederten Fahrzeug aus translatorischen Transportbelastungen Drehbewegungen. Neben der hierdurch anteilig wirkenden Erdbeschleunigung werden in Abhängigkeit der Position der Ladung zum jeweiligen Momentanpol sowie den Abmaßen der Ladung in den einzelnen Bereichen der Ladung weitere translatorische Beschleunigungsanteile induziert. Während bei Starrkörpern diese Anteile im Schwerpunkt zusammengefasst werden, ist das bei Ladeinheiten aus einzelnen Packstücken oder granularen Ladungen nicht möglich. Dieser Aspekt wird zurzeit in den aktuellen Richtlinien/Normen sowie Prüfverfahren für Ladungssicherung vernachlässigt. Die Wirkung auf die unterschiedlichen Ladungstypen ist nicht bekannt und bedarf weiterer Untersuchungen. Aufgrund einer fehlenden Datengrundlage werden an dieser Stelle die maximalen Werte der Drehbewegung der in Anhang A dargestellten Simulationsergebnisse für einen 7,5 t Lkw aufgeführt, um eine Auslegung eines entsprechenden Prüfverfahrens zu ermöglichen. Die entsprechenden Werte für einen Sattelzug liegen unter den Werten des 7,5 t Lkw und sind im Anhang aufgeführt.

Tabelle 3: Maximalwerte für die Drehbewegungen eines 7,5 t Lkw (simuliert mit ipg Truckmarker)

	Winkel in rad	Winkelgeschwindigkeit in rad/s	Winkelbeschleunigung ²⁰⁴ in rad/s ²
Nick-	0,09	0,35	1,41
Roll-	0,18	0,38	2,30
Schwimm-	0,08	0,72	0,56

4.2.2 Dauer

Sobald die aus den Transportbelastungen resultierenden „Massenträgheitskräfte“ größer als die Sicherungskräfte sind, setzt sich das Ladegut in Bewegung. Die daraus entstehende Schwerpunktverschiebung der Ladung sowie die in der Ladung gespeicherten relativen Bewegungsenergie sind quadratisch von der Belastungsdauer abhängig.

Eine Darstellung der üblichen Belastungsdauern (Vollbremsung aus 20 m/s mit $7,85 \text{ m/s}^2$ ist $\tau = 2,6 \text{ s}$; 180° Kurvenfahrt mit einem Radius von 100 m ist $\tau = 15,7 \text{ s}^{205}$) ist mit dem

²⁰⁴ Gemittelt über den Anstieg der maximalen Winkelgeschwindigkeit

²⁰⁵ Vernachlässigung der Schwellzeit und unter Annahme einer konstanten Beschleunigung

Prinzip des Beschleunigungsschlittens²⁰⁶ wirtschaftlich kaum/nicht darstellbar, erscheint allerdings auch nicht notwendig:

- Sobald die relative Geschwindigkeit zwischen der Ladung und Ladefläche sowie die Verformungsgeschwindigkeit des Ladungssicherungssystems während der Dauer der Prüfbelastung gleich Null werden, ist die Prüfdauer hinreichend.
- Sobald die zulässigen Grenzwerte (Verschiebung, Kraftabstützung, Impulsaustausch etc.) während der Prüfung überschritten werden, ist die Prüfdauer hinreichend und das Ladungssicherungssystem nicht geeignet.

Für eine Vorabermittlung der mindestens erforderlichen Belastungsdauer sind genaue Kenntnisse über das Verhalten des Ladungssicherungssystems notwendig. Aufgrund der enormen Vielfalt an unterschiedlichen Ladungen und Einrichtungen/Hilfsmitteln zur Ladungssicherungen sind diese in der Regel nicht vorhanden und in empirischen Studien zu gewinnen.

Nach Untersuchungen von Juwet^{207,208} mit einem rein horizontalen Beschleunigungsschlitten wird die maximale Verformung einer Ladeeinheit innerhalb einer Beschleunigungszeitdauer von 0,4 s erreicht. Dieser Wert wird daher auch für die Auslegung des zu entwickelnden Prüfverfahrens übernommen. Für eine Evaluation von Ladungssicherungssystemen ist eine der oben genannten Bedingungen zu erfüllen. Ist dies nicht möglich, ist zu prüfen, ob durch Identifikation einzelner Parameter des Verhaltens (Reibung, Verhalten der Ladeeinheit, Verhalten der ungesicherten Ladung, Verhalten der Sicherungseinrichtung und Hilfsmittel) nicht dennoch Aussagen über beispielsweise eine Interpolation der Ergebnisse möglich ist.

4.2.3 Gradient der Beschleunigung

Die Richtlinie Eumos 40509²⁰⁹ des gleichnamigen europäischen Sachverständigenverbandes quantifiziert erstmals im Bereich der Ladungssicherung die Zeitdauer (Schwellzeit) mit 0,05 s bis die jeweilige Prüfbeschleunigung erreicht ist. Daraus ergeben sich Beschleunigungsgradienten je nach zu prüfender Beschleunigungsamplitude von 98,1 m/s³ bis 196,2 m/s³.

Aus fahrzeugtechnischer Sicht sind diese Werte allerdings zu hoch, denn sie liegen weit oberhalb der Werte, die für ein übliches Transportfahrzeug möglich sind. Tabelle 4 zeigt

²⁰⁶ Die Eignung anderer Prinzipien zur Darstellung der horizontalen Beschleunigungen wurde in Abschnitt 2.3.1 ausgeschlossen

²⁰⁷ Vgl. Juwet, M. et al.: Acceleration Test Machine, S. 141

²⁰⁸ Vgl. Juwet M.: Testmethode zur Untersuchung der Stabilität von Ladeeinheiten, 2010, S. 176

²⁰⁹ Vgl. EUMOS 40509, 2012

die ermittelten Gradienten – die kurzzeitig erreichte Maximalwerte sowie die über den Beschleunigungsanstieg gemittelten Werte – aus 19 Brems- sowie 18 Ausweichmanövern mit sechs verschiedenen Sattelzügen sowie die entsprechenden Werte aus der Fahrdynamiksimulationen.

Tabelle 4: In Fahrversuchen und Simulationen²¹⁰ ermittelte Beschleunigungsgradienten für Sattel-Kfz und Lkw

Fahrmanöver	Maximalwert des Gradienten in m/s^3	Über die Beschleunigungszeit gemittelter Gradient in m/s^3
Bremsmanöver nach DIN 12642	64,4	29,8
Ausweichen DIN 12642	10,3	5,5
Bremsmanöver nach DIN 12642 Simulation Sattelzug [7,5 t Lkw]	28,4 [50,7]	18,8 [14,7]
Ausweichen DIN 12642 Simulation Sattelzug [7,5 t Lkw]	18,6 [32,7]	1,8 [2,5]
Roundabout-Test (Kreisverkehrsdurchfahrt) Simulation Sattelzug [7,5 t Lkw]	31,5 [48,2]	3,1 [2,4]
Lenkwinkelsprung Simulation Sattelzug [7,5 t Lkw]	19,4 [22,4]	7,51 [8,4]

Der ermittelte Maximalwert des Beschleunigungsgradienten bei einem Bremsmanöver liegt bei ca. 65 m/s^3 , der über den Beschleunigungsanstieg gemittelte Wert liegt bei ca. 30 m/s^3 . In lateraler Richtung liegt der maximale Wert deutlich unterhalb. Insbesondere der gemittelte Wert zeigt diesen Aspekt auf: Der höchste gemittelte laterale Beschleunigungsgradient wurde mit Hilfe eines Lenkwinkelsprunges ermittelt und liegt bei ca. $8,5 \text{ m/s}^3$. Zwischen longitudinalem und lateralem Beschleunigungsgradienten liegt somit ein Faktor von drei bis vier. Die erreichbaren Beschleunigungsgradienten sind abhängig vom Reifen (Reifenmodell) und weiteren Fahrzeugparametern (Bremssystem, Nick- und Wanksteifigkeit, etc.).

²¹⁰ Vgl. Anhang A

Nach Ermittlung der beim Transport repräsentativen Beschleunigungsgradienten bleibt deren Wirkung auf Ladungssicherungssysteme zu klären: Empirische Studien zur Quantifizierung der Wirkung des Beschleunigungsgradienten sind nicht bekannt. Untersuchungen von Podzuweit²¹¹ belegen allerdings einen Einfluss auf die Bewegungsauslösung der Ladung: „Eine kurze Schwellzeit [versetzt] eine Ladung früher in Gleitbewegung“²¹². Eine genauere Begründung bleibt aus. Auch bei formschlüssigen Ladungssicherungen mit Ladelücke hat der Gradient²¹³ durch die der Ladung gespeicherte Bewegungsenergie einen Einfluss.

Dieser Einfluss wird unter Vernachlässigung der Reibung und der Annahme eines bis zum Erreichen der Prüfbeschleunigung \ddot{x}_1 konstanten Beschleunigungsgradienten \ddot{x}_0 exemplarisch ermittelt.

$$\ddot{x} = \begin{cases} \ddot{x}_0 & \left| \ddot{x}_0 t_{\text{Aufprall}} < \ddot{x}_1 \right. \\ 0 & \left| \ddot{x} t_{\text{Aufprall}} \geq \ddot{x}_1 \right. \end{cases} \quad (4.3)$$

Bei einer Prüfbeschleunigung von $\ddot{x}_1 = 7,84 \text{ m/s}^2$ und einer 8 cm großen Ladelücke unterscheidet sich die Aufprallgeschwindigkeit des Ladegutes um 16,8 % bei einem Beschleunigungsgradienten von $\ddot{x}_0 = 100 \text{ m/s}^3$ im Vergleich zu einem Gradienten von $\ddot{x}_0 = 30 \text{ m/s}^3$.

Zukünftig sind in empirischen Studien die oben genannten Einflüsse weiter zu spezifizieren sowie weitere Einflüsse zu identifizieren (beispielsweise der Einfluss auf die Ladeeinheitenstabilität). Für die Auslegung des Prüfstandes werden allerdings die EUMOS-Vorgaben herangezogen.

4.2.4 Anzahl der Beschleunigungsrichtungswechsel

Während bei einem Bremsmanöver sowie bei einer einfachen Kurvenfahrt die Beschleunigung nur in einer Richtung wirkt, wechselt die Beschleunigung beim einem Ausweichmanöver oder einer Kreisverkehrsdurchfahrt einmal oder mehrmals das Vorzeichen. Falls Freiräume in der Richtung der Transportbelastung im Ladungssicherungssystem bestehen, also beispielsweise zwischen der Ladung und der seitlichen Laderaumbegrenzungen, so verlagert/verschiebt sich die Ladung bei der ersten Beschleunigungsamplitude hin zur Begrenzung/dem Sicherungsmittel. Beim Richtungswechsel verlagert/verschiebt sich die

²¹¹ Vgl. Podzuweit, U.: Sicherung von Kurzholz auf Straßenfahrzeugen, 2005 S. 55

²¹² Podzuweit, U.: Sicherung von Kurzholz auf Straßenfahrzeugen, 2005 S. 55

²¹³ In Abhängigkeit der Ladelücke und der Prüfbeschleunigung

Ladung auf die gegenüberliegende Seite. Zum einen ist der für die Verschiebung zur Verfügung stehende Weg somit größer und zum anderen wird die bei der ersten Beschleunigungsamplitude im Sicherungssystem gespeicherte potentielle Energie in kinetische Bewegungsenergie der Ladung umgewandelt. Hierdurch ist die dynamische Belastung der Laderaumbegrenzung auf der gegenüberliegenden Seite durch das Auftreffen der Ladung größer²¹⁴. Derartige Beschleunigungsverläufe stellen somit ein Worst-Case-Szenario für Ladungssicherungen dar²¹⁵ und werden mithilfe des in der DIN 12642 definierten Ausweichmanöver auch dargestellt. Für zukünftige experimentelle Verfahren besteht daher die Notwendigkeit diese Art der Beschleunigungsverläufe auch darzustellen und die Wirkung näher zu spezifizieren.

4.2.5 Häufigkeit der Belastung

Jede Belastung, die einen material- bzw. systemabhängigen Grenzwert überschreitet (z.B. Überschreitung der Steckgrenze bei Metall) besitzt eine nicht reversible Wirkung, so auch bei Ladungssicherungssystemen. Je nach Bewertungs-/Ausschlusskriterium führt eine einmalige Überschreitung eines definierten Grenzwertes für eine bestimmte Zeitdauer nicht zwangsweise zu einem (sichtbaren) Versagen des Ladungssicherungssystems. Die Ladeeinheitensicherung durch Folie beispielsweise weist in der Regel ein relativ großes Verformungsvermögen auf, bevor diese partiell versagt/einreißt. In Abhängigkeit des Ladungssicherungssystems und je nach Lastfall besteht demnach die Möglichkeit, dass erst nach mehrfacher Einwirkung der Grenzbelastung über eine bestimmte Zeitdauer, ein Versagen der Sicherung eintritt. Um diesem Umstand vorzubeugen, ist bei der Überprüfung der Ladungssicherung nach DIN EN 12642²¹⁶ jeder Fahrversuch mindestens drei Mal ohne nachzusichern zu absolvieren. Inwieweit eine dreimalige Grenzsituation repräsentativ für das Verkehrsgeschehen ist und welches Sicherheitsniveau hierdurch erreicht wird, bleibt jedoch unklar. Hier bedarf es ladungssicherungssystemabhängige Untersuchungen unter Einbeziehung einer statistisch abgesicherten Häufigkeitsverteilung von Transportbelastungen. Bei Ladungen, die vom Fahrer nach einer Grenzsituation (Notbremsung, Ausweichmanöver) nicht unmittelbar zugänglich und kontrollierbar sind (beispielsweise, wenn der Laderaum durch eine Zollplombe für den Fahrer nicht zugänglich ist), ist eine mehrfache Prüfung empfehlenswert.

²¹⁴ Vgl. Berg, A. et al.: Investigation of cargo safety, 2002, S. 9 ff

²¹⁵ Vgl. Fenn, B. et al.: The security of cross loaded round timber, 2003, S. 34

²¹⁶ Vgl. DIN EN 12642:2006, 2007, S. 18 ff

4.2.6 Vorkonditionierung der Ladung

Im Allgemeinen hat jede Belastung auf ein Material/System eine reversible und/oder permanente Wirkung zur Folge. Diese Folgen können bereits deutlich vor dem Erreichen der zu prüfenden Grenzfälle/Testfälle auftreten und einen negativen Effekt auf das Sicherheitsniveau von Ladungssicherungssystemen ausüben. Beispiele hierfür sind Relaxionsvorgänge in Zurrgurten und Setzvorgänge in der Ladung, die die Sicherungswirkung von Niederzurrungen mindern bzw. aufheben. Aber auch andere Belastungen wie beispielsweise die Temperatur oder die Luftfeuchtigkeit, der die Ladung vor oder beim Transport ausgesetzt war/ist, nehmen in Abhängigkeit des Ladungssicherungssystems Einfluss auf dessen Verhalten. Als Beispiel hierfür sind granulare Ladungen zu nennen, die in Abhängigkeit ihrer Vorgeschichte (Luftfeuchtigkeit, Dichte, Abriebbildung, Lagerzeit etc.)²¹⁷ ihre Fließeigenschaften ändern. Demnach sind die Ladungen bzw. die Ladungssicherungssysteme vor der eigentlichen Prüfung in Abhängigkeit der spezifischen Charakteristika vorzukonditionieren. Hierfür bedarf es genauer Kenntnisse über die jeweiligen Einflussfaktoren und die Möglichkeit, diese kontrolliert vor und während der Prüfung nachzubilden bzw. einen großen und vielfältigen Stichprobenumfang, um die damit einhergehenden statistischen Unsicherheiten zu verringern.

4.2.7 Vertikale Vibrationen

Die durch externe Fahrzeuganregung hervorgerufenen Vibrationen sind im Allgemeinen instationäre stochastische Schwingungen²¹⁸. Die Stochastizität resultiert dabei aus den zufallsabhängigen Unregelmäßigkeit der Fahrbahnoberfläche. Die Instationarität wird hervorgerufen durch wechselnde Fahrbahnoberflächen, sich ändernde Beladungszustände und den damit einhergehenden Änderungen der Übertragungsfunktion des Fahrzeugs sowie durch unterschiedliche Fahrmanöver²¹⁹.

Die Schwingprüfung/Umweltprüfung dient zur Untersuchung der Auswirkungen einer realen Vibrationsumgebung (Transport) auf ein Prüfobjekt (in der Regel ein verpacktes Produkt). Ziel dieser Prüfungen ist die Dauerhaltbarkeit des Prüflings in dieser Umgebung sicherzustellen bei möglichst geringem Verpackungsmaterialeinsatz. Hierzu werden in der Praxis verschiedene Verfahren eingesetzt, die sich hinsichtlich der Komplexität der Realitätsdarstellung unterscheiden: Von der einfachen Sinusprüfung bis hin zur Ein- bzw. Mehr-Achs-Prüfung.

²¹⁷ Vgl. Schulze, D.: Schüttgüter, 2009, S. 20 ff

²¹⁸ Vgl. Shires, D.: Methodologies for Vibration Testing Packaged-Products, 2014, S. 1

²¹⁹ Vgl. DIN EN 15433-3:2007 S. 7

Bei der Ein-/Mehr-Achs-Prüfung wird das Prüfobjekt gemäß definierter spektraler Leistungsdichten²²⁰ rauschförmig angeregt. Da die beim Transport auftretenden Schwingungen keiner Gaußverteilung entsprechen, wird bei neueren Verfahren auch die Kurtosis²²¹ eines Transportes simuliert/kontrolliert bzw. zusätzlich eine Häufigkeitsverteilung der Signalleistung/des Effektivwertes dargestellt. Während bei den letztgenannten Methoden die Transportbelastungen statistisch ausgewertet werden, werden bei der „*Time Wave Replication*“ aufgenommene Transportbelastungen exakt nachgebildet²²². Für die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsmethode sind neben dem eigentlichen Untersuchungszweck auch fundierte Kenntnisse über das Prüfobjekt erforderlich²²³.

Abweichend von der Verpackungsprüfung steht bei dem in dieser Dissertation thematisiertem Evaluationsverfahren nicht die Dauerhaltbarkeit bzw. das Versagen einzelner Packstücke während eines gesamten Transportes im Vordergrund, sondern die Wirkung der vertikalen Vibrationen auf das gesamte Ladungssicherungssystem während einzelner Worts-Case-Situationen des Verkehrs. Hierbei ist insbesondere die Beeinflussung der Reibung zwischen Ladung und Laderaum sowie zwischen den einzelnen Ladungsschichten von Interesse.

4.2.7.1 Abschätzung der Größen

Nachfolgend werden die Ergebnisse von ca. 700 km Fahrt eines mit Betonbauteilen beladenem Sattelfahrzeugs rund um Darmstadt (Landstraße, Autobahn) dargestellt, die im Rahmen einer, vom Verfasser dieser Dissertation initiierten und betreuten, studentischen Arbeit²²⁴ ausgewertet wurden. Aufgrund der relativ geringen Kilometerzahl und der Durchführung mit lediglich einem Fahrzeug können die Ergebnisse nicht als repräsentativ angesehen werden. Angesichts eines Mangels an veröffentlichten, wissenschaftlich abgesicherten und hinreichend beschriebenen Daten zu dynamischen Transportbelastungen²²⁵ dienen sie zur Abschätzung der Größenordnung der beim Transport auftretenden vertikalen Transportbelastungen und somit zur Auslegung eines entsprechenden Prüfverfahrens.

²²⁰ Die spektrale Leistungsdichte stellt die Leistung eines Signals über die einzelnen Frequenzen dar.

²²¹ Die Kurtosis (Wölbung) beschreibt die Steilheit/Spitzigkeit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion.

²²² Vgl. Shires, D.: *Methodologies For Vibration Testing Packaged-Products*, 2014, S. 1

²²³ Vgl. DIN EN 60068-3-8:2003, S. 8

²²⁴ Vgl. Kilian, M.: *Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines Ladungssicherungsprüfstandes*, 2014

²²⁵ Vgl. DIN EN 15433-3, 2008, S. 3

Tabelle 5: Effektivwerte und Kurtosis-Werte vertikaler Transportbelastungen eines luftgefederten Sattel-Kfz bei Fahrten rund um Darmstadt²²⁶

Straße	Beladungs- zustand	Effektiv- wert in m/s^2	Effektiv- wert 3σ in m/s^2	Kurtosis	Kurtosis 3σ
Autobahn	30 %	1,16	2,35	8,60	4,47
Landstraße	30 %	0,85	2,00	12,48	4,63
Autobahn	50 %	1,03	2,06	8,32	4,16
Landstraße	50 %	0,74	1,70	11,69	4,73
Autobahn	70 %	1,05	2,06	8,11	4,27
Landstraße	70 %	0,75	1,78	12,36	4,30

In Tabelle 8 sind die Effektivwerte sowie die Kurtosiswerte der durchgeführten Messfahrten getrennt nach Straßenart und Beladungszustand des Sattelzugs aufgeführt. Zusätzlich werden die entsprechenden Werte für die dabei auftretenden Worst-Case-Events²²⁷ (3σ) aufgezeigt. Aufgrund der bei der Autobahnfahrt erhöhten Geschwindigkeit fallen die Effektivwerte im Vergleich zur Landstraßenfahrt größer aus. Die Landstraßenfahrten weisen hingegen einen größeren Kurtosis-Wert auf. Dies ist auf die häufigeren Änderungen der Fahrgeschwindigkeit als auf Autobahnen zurückzuführen. Die Autobahnfahrt mit einem Beladungsgrad von 30 % weist den größten Effektivwert für die gesamte Messfahrt sowie die Worst-Case-Events auf. In Abbildung 21 sind die zugehörigen Leistungsdichtespektren, die Verteilungsdichten der Amplituden sowie die kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte dargestellt²²⁸. Erhöhte Signalleistungen treten bei den Frequenzen 2, 5 und 9 auf. Diese sind auf die Eigenfrequenzen des Aufbaus (2 Hz) und der Achsen zurückzuführen (9 – 12 Hz)²²⁹. Der positive sowie negative Maximalwert der Amplitude liegt bei rund dem Einfachen der Erdbeschleunigung. Der Effektivwert der Worst-Case-Events liegt bei $2,35 \text{ m/s}^2$. Diese Werte werden als Grundlage für die Auslegung des zu entwickelnden Prüfverfahrens herangezogen. Eine weitere Steigerung der Kritikalität bei allerdings gleichzeitiger Minderung der Repräsentativität des zu prüfenden Lastfalls ist der kumulativen Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte zu entnehmen.

²²⁶ Vgl. Kilian, M.: Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines Ladungssicherungsprüfstandes, 2014

²²⁷ Ein Worst-Case-Event liegt vor, sobald die Beschleunigungsamplitude im Messsignal einen definierten Grenzwert, das dreifache der Standardabweichung, der jeweiligen gesamten Messfahrt überschreitet. Für die Auswertung der Worst-Case-Events wird ein symmetrisches Zeitfenster von 1 s um diese Grenzwertüberschreitung berücksichtigt. Die Zeitabschnitte der einzelnen Worst-Case-Events werden aneinandergereiht und daraus der gesamte Effektivwert sowie die Kurtosis berechnet.

²²⁸ Für die restlichen Messfahrten sind die entsprechenden Darstellungen im Anhang A3 aufgeführt.

²²⁹ Vgl. Vogt, H.: Zum Einfluss von Fahrzeug- und Straßenparametern, 2012, S. 52

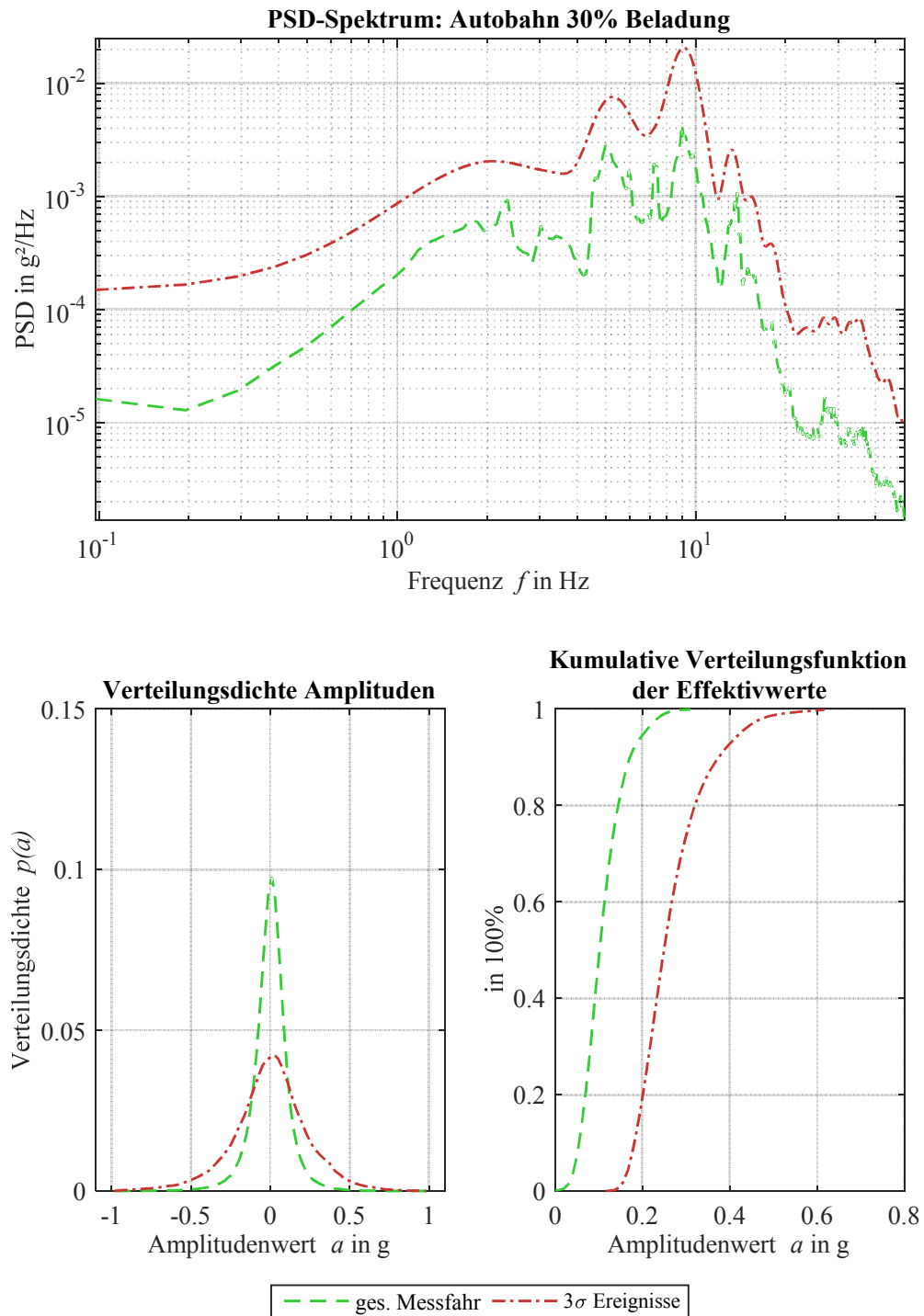


Abbildung 21: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 50% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Autobahnfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

Eingrenzung des Frequenzbereiches aufgrund der Reibkraftvermindernden Wirkung

Für die Eingrenzung des relevanten Frequenzbereiches wird der Grenzfall betrachtet, bei dem die auf das Ladegut wirkende Beschleunigung \ddot{x} und die statische Reibkraft²³⁰ μg im Gleichgewicht sind. Des Weiteren werden die vertikalen Vibrationen als „einfache“ Sinusschwingung mit der Amplitude \hat{a}_z und der Frequenz f angenommen. Die resultierende Ladungsbeschleunigung \ddot{x}_{La} entspricht demnach auch einer Sinusschwingung.

$$\ddot{x}_{La} = \mu(\hat{a}_z \sin(2\pi f t)) . \quad (4.4)$$

Somit erfährt die Ladung während der positiven vertikalen Beschleunigungsamplitude eine relativ zur Ladefläche horizontale Beschleunigung und wird bei der negativen Beschleunigungsamplitude wieder bis zum Stillstand abgebremst. Durch zweifache Integration des Beschleunigungsverlaufs vom Zeitpunkt $t_1 = 0$ bis zum Zeitpunkt $t_2 = \tau$ und den Integrationskonstanten $C_1 = \hat{a}_z / 2\pi f$ und $C_2 = 0$ wird die Verschiebung der Ladung ermittelt.

$$x_{La} = \left[\mu \left(\hat{a}_z \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot t)}{4\pi^2 f^2} + \frac{\hat{a}_z \cdot t}{2\pi f} \right) \right]_0^\tau . \quad (4.5)$$

Unter Einbeziehung der in den vorherigen Abschnitten ermittelten Prüfparameter $\tau = 0,4 \text{ s}$ und $\hat{a}_z = 2,35 \text{ m/s}^2$, einer Festsetzung einer zulässigen Verschiebung aufgrund von Vertikalanregung auf $x_{La,zul} = 4 \text{ mm}$ (5 % der zulässigen Ladelücke nach VDI 2700 B18²³¹) sowie eines angenommenen Reibwertes $\mu = 0,6$ (entspricht dem Reibwert einer rutschhemmenden Unterlage) ergibt sich eine maximale Frequenz von $f = 23 \text{ Hz}$, die es im zukünftigen Prüfverfahren noch darzustellen gilt.

Diskussion zur Abschätzung der vertikalen Transportbelastungen

Die Abschätzungen der vertikalen Transportbelastungsparameter (Effektivwert und maximale Beschleunigungsamplitude) basieren auf Messfahrten mit lediglich einem Sattelzug während gewöhnlicher Transportvorgänge auf der Landstraße und der Autobahn. Sie sind demnach hinsichtlich der Fahrstrecke und dem Fahrzeug nicht repräsentativ und durch zukünftige Vergleichsmessungen zu verifizieren. Aufgrund der Abhängigkeit der vertikalen Transportbelastungen von den Fahrmanövern besteht zukünftig die Notwendigkeit die Lastkollektive fahrmanöverspezifisch zu ermitteln.

²³⁰ Coulombsche Reibung wird angenommen

²³¹ Vgl. VDI 2700 Blatt 18 - Entwurf, 2014

Der Frequenzbereich wurde hinsichtlich der reibkraftvermindernden Wirkung anhand einer vereinfachenden Grenzfallbetrachtung eingegrenzt. Dabei wurden weitere Erscheinungen, die mit den vertikalen Vibrationen einhergehen, nicht berücksichtigt:

- die Setzerscheinung von Ladungen, die durch vertikale Vibrationen begünstigt werden²³²
- die Beeinflussung der Fließeigenschaften von granularen und ähnlichen Ladungen²³³

Welche Relevanz diese Effekte auf Ladungssicherungssysteme während der Prüfung haben und welcher Frequenzbereich hierfür darzustellen ist, bedarf weiterer Untersuchungen und gegebenenfalls Anpassungen an dem zu entwickelnden Prüfverfahren.

4.3 Fazit und Diskussion zu den Ergebnissen

“Die Kenntnis von Transportbelastungen ist eine wesentliche Basisinformation zur wirtschaftlichen und umweltverträglichen Gestaltung von Transporten. Sie bedarf aufgrund technischer Entwicklungen im Transportwesen einer ständigen Erneuerung und Erweiterung“. ²³⁴ Gegenstand dieses Kapitels ist daher die Analyse der beim Straßentransport auftretenden Belastungen und die Ableitung von Lastfällen für das zu entwickelnde Prüfverfahren. Grundlage hierfür bildet, die in Abschnitt 1 und 2 dargestellte Dekomposition der Transportbelastungen und die damit einhergehende vollständige Ermittlung der für Ladungssicherungssysteme relevanten Parameter. In den weiteren Abschnitten werden die Ergebnisse zur Quantifizierung der einzelnen Belastungsparameter, die auf Literaturdaten, Simulation, Fahrversuchen und/oder analytischen Berechnungen basieren, vorgestellt. Diese gilt es in zukünftigen Prüfverfahren umzusetzen. Insbesondere bei den real durchgeführten Versuchsfahrten, aber auch bei den virtuellen Fahrversuchen handelt es sich um exemplarische Ergebnisse. Daher sind diese zukünftig durch weitere wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse zu kalibrieren. Eine Prüfung mit einer Kombination aus den dargestellten Grenzen der Belastungsparameter (Auslegungsgrenzen des Prüfverfahren) hat höchstwahrscheinlich ein „sehr sicheres“ Ladungssicherungssystem zur Folge. Allerdings führt dies wohl zu keiner wirtschaftlichen Auslegung. Hinsichtlich einer hinreichend sicheren und zugleich wirtschaftlichen Auslegung eines Ladungssicherungssystems bedarf es abgesicherter Erkenntnisse über die realen Transportbelastungen von Transportfahrzeugen und einer probabilistischen Risikoabwägung, um die relevanten

²³² Vgl. Podzuweit U.: Schüttgut in BigBags, 2012 S. 7

²³³ Vgl. Kollmann, T.: Schwingungsinduziertes Fließen, 2002, S. 154

²³⁴ DIN EN 30786-1:2002, S. 6

Testfälle zu generieren. Ein solches Verfahren ist in Abbildung 22 dargestellt und wird im Folgenden erläutert: Aus wissenschaftlicher Sicht steht beim Test von Ladungssicherungssystemen nicht die Zertifizierung eines Ladungssicherungssystems im Vordergrund, sondern der Erkenntnisgewinn beim Auffinden eines Fehlers. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer mehrmaligen, bis zum Versagen durchgeführten Prüfung. Auf der Basis von statistisch abgesicherten Transportbelastungsdaten und Apriori-Kenntnissen über das Ladungssicherungsverhalten werden unter zur Hilfenahme der Statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) die Prüfparameter ermittelt und aufbauend auf den Erkenntnissen der vorausgegangenen Versuche bis zum Versagen variiert. Hierdurch wird ein nachhaltiger Wissensaufbau über die Versagensgrenzen und das Verhalten von Ladungssicherungssystemen ermöglicht, der die Basis für eine effiziente und effektive Optimierung zukünftiger Ladungssicherungssystemen bildet.

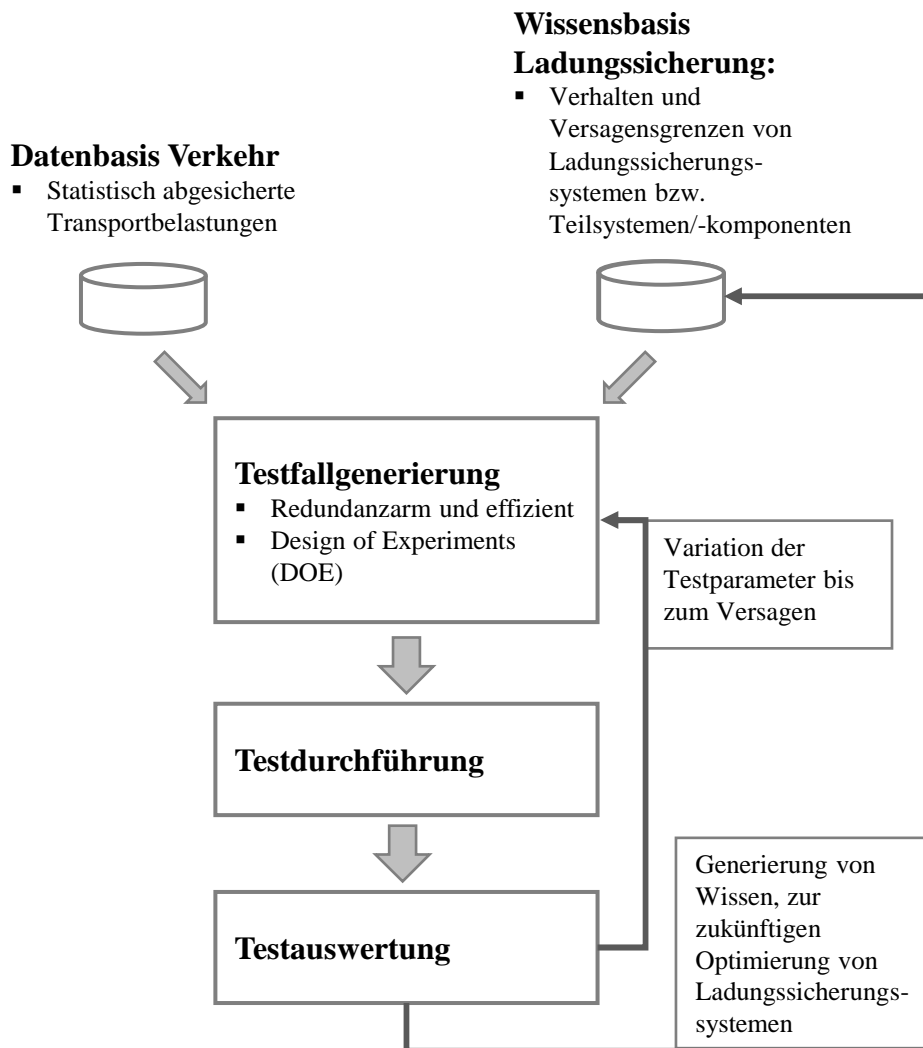


Abbildung 22: Ablaufplan zur Testfallgenerierung für Ladungssicherungssysteme

5 Testwerkzeug

Um Ladungssicherungssysteme reproduzierbar und umfassend wissenschaftlich zu untersuchen, besteht die Notwendigkeit, die relevanten Transportbelastungen simultan und in ausreichender Länge abzubilden sowie die erforderlichen Bewertungsgrößen zu erfassen. Die Gesamtfunktion des Testwerkzeugs lässt sich in vier Hauptteilstfunktionen aufgliedern²³⁵ (vgl. Abbildung 23):

- Aufnahme der Ladung (inklusive Ladungssicherungseinrichtungen)
- Transportsimulation
 - Darstellung der horizontalen Beschleunigungen
 - Darstellen der vertikalen Beschleunigungen
- Erfassen/Messen der Bewertungsgrößen

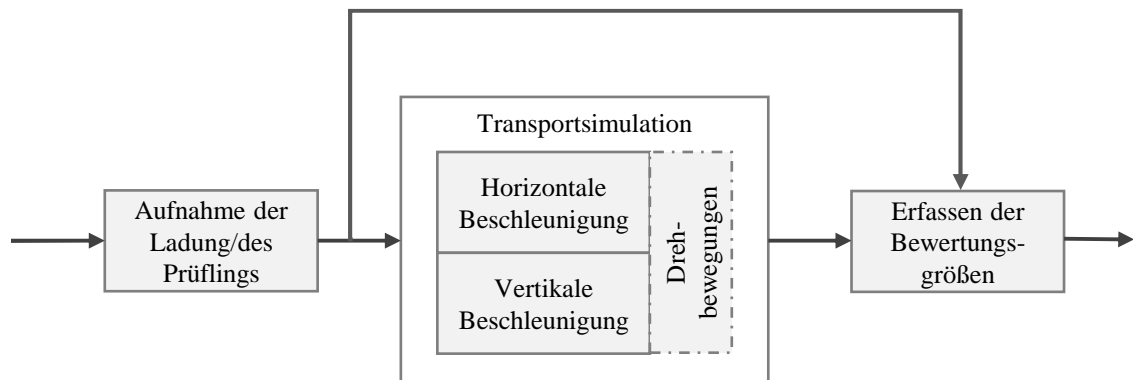


Abbildung 23: Funktionsstruktur des Testwerkzeugs

In den folgenden Abschnitten wird die am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und aufgebaute Vorrichtung – diese beinhaltet die Transportsimulation sowie die Aufnahme der Ladung – sowie die eingesetzten Messsysteme beschrieben.

²³⁵ Die Drehbewegung wird als optional angesehen (vgl. Kap 4.2.1.3) und wird nicht gesondert aufgeführt

5.1 Hydraulisches Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK)²³⁶

5.1.1 Grundlegende Beschreibung

In Kapitel 2 wird aufgezeigt, dass die horizontalen Beschleunigungsvorgänge wegen des aus der notwendigen Drehbewegung resultierenden, inhomogenen Beschleunigungsverlaufs nicht allein durch die Nutzung der Gravitation erfolgen kann. Dieser Sachverhalt gilt auch für die Ausnutzung der Zentrifugal- oder Coriolisbeschleunigung und einer Kombination der genannten physikalischen Prinzipien. Lediglich das Prinzip der Trägheit, für das sich seit Jahrzehnten Beschleunigungsschlitten bewährt haben, ist geeignet. Der rein horizontale Beschleunigungsverlauf bei üblichen Schlittenprüfständen ist durch ein geeignetes Führungssystem und eine entsprechende Anregung um eine zusätzliche vertikale Bewegung/Beschleunigung zu erweitern. Hierbei sind die in Kapitel 4 definierten Anforderungen an die darzustellenden Lastfälle zu beachten. Die in Abbildung 24 dargestellte Vorrichtung basiert auf diesen Überlegungen und vereint die Untersuchungsmöglichkeiten eines horizontalen Beschleunigungsschlittens mit denen eines mehrachsigen Vibrationstisches.

Systembedingt erfolgt die horizontale Beschleunigung einaxial. Durch die vorhandenen variablen Anbringungsmöglichkeiten der Sicherungseinrichtungen und –hilfsmittel sowie durch eine Drehung der Ladung um 90° ist neben der Darstellung eines longitudinalen Fahrmanövers auch ein laterales simulierbar (vgl. 5.1.4).

²³⁶ Größtenteils übernommen (an einigen Stellen ergänzt) aus K.Klonecki: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung des Verhaltens von Ladung und Ladungssicherungsmaßnahmen, 2014

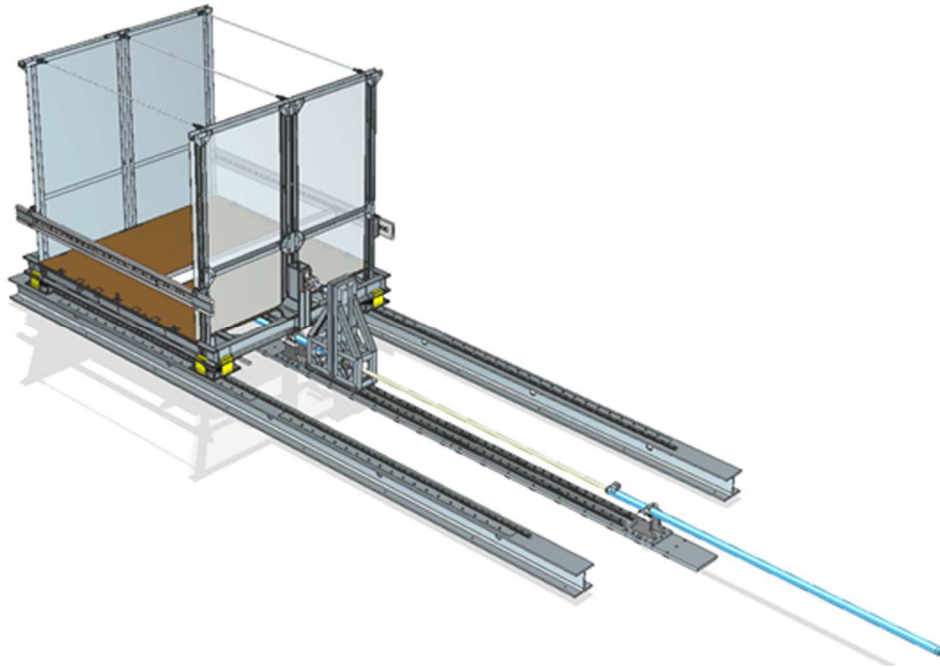


Abbildung 24: Hydraulisches Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK)

5.1.2 Abbildung der vertikalen Beschleunigungen

Die Darstellung vertikaler Beschleunigungen an einem mobilen Prüftisch ist prinzipiell auf zwei Arten möglich: Zum einen durch die vertikale Beschleunigung des gesamten Prüfstands (Prüftisch, Führungssystem, horizontalwirkende Aktoren), zum anderen durch die ausschließliche vertikale Beschleunigung des mobilen Prüfschlittens.

Im Vergleich zur Beschleunigung des Prüftisches, hat eine vertikale Bewegungsanregung des gesamten Prüfstands eine erhebliche Steigerung der benötigten Stellkräfte und somit auch einen beträchtlich erhöhten finanziellen Aufwand zur Folge und wurde daher nicht weiter verfolgt. Die vertikale Beschleunigung einer horizontalen mobilen Plattform erfordert neben einem Mechanismus zum Erzeugen der benötigten Stellkräfte von mehr als 40 kN²³⁷ noch ein möglichst leichtes horizontales Führungssystem mit vertikalem Freiheitsgrad, welches idealerweise darüber hinaus eine definierte Nickbewegung des Schlittens ermöglicht.

²³⁷ Die Nutzlast des Prüfstandes beträgt 3 t; Die Schlittenmasse beträgt, je nach Aufbau, ungefähr 1 t; Maximale vertikale Beschleunigungsamplitude beträgt 9,81 m/s².

5.1.2.1 Erzeugung der benötigten Stellkräfte

Aufgrund der Aktormasse hydraulischer Schwingerregern (Hydropulsanlagen) oder elektrodynamischen Shakern mit einer maximalen Stellkraft $\geq 40 \text{ kN}$, von mehr als 2 t ²³⁸ eignen sie sich nicht für den Einsatz an einem mobilen Prüftisch. Aus dem Bereich der üblich eingesetzten Erregersysteme der Schwingungstechnik²³⁹ eignet sich demnach lediglich die Anregung durch einen Unwuchtmotor für die Erzeugung der benötigten Stellkräfte. Unwuchtmotoren basieren auf dem Prinzip der Fliehkraft. Eine auf einer rotierenden Welle des axial angebrachte Masse ruft eine Trägheitskraft hervor, die radial von der Rotationsachse nach außen gerichtet ist. Sie sind ab einer Drehzahl der unwuchttragenden Achse von 750 U/min als Zukaufteile verfügbar. Somit ist eine harmonische vertikale Anregung oberhalb von 12,5 Hz möglich.

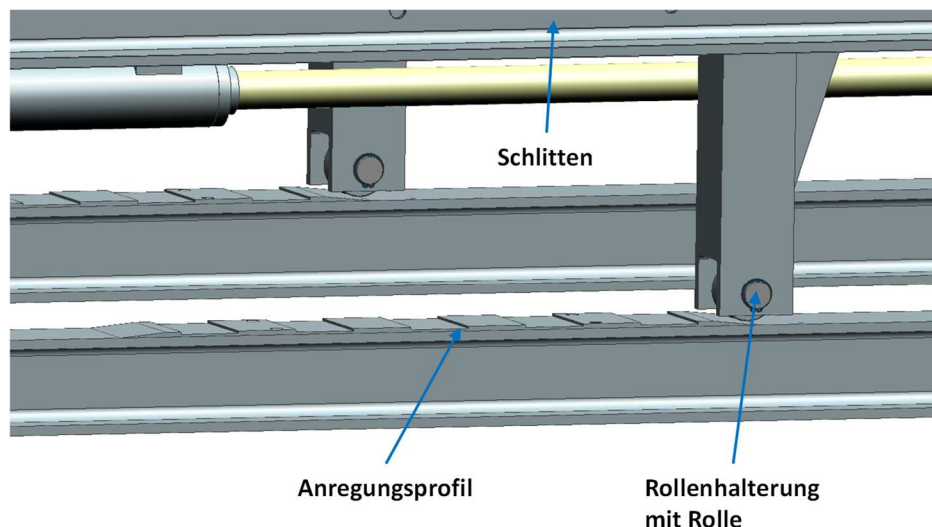


Abbildung 25: Anregung durch das Überfahren von Unebenheiten

Für eine pseudo-stochastische Anregung wird die horizontale Bewegungsenergie des Prüftisches ausgenutzt. Hierfür werden am Prüftisch zusätzliche Laufrollen starr angebracht (vgl. Abbildung 25), die bei Verschiebung des Prüftisches ein definiertes Anregungsprofil überfahren und somit die horizontale Bewegung teilweise in eine vertikale Bewegung umformen. Dies ermöglicht bei entsprechender Gestaltung des Anregungsprofils, in Abhängigkeit der Rollengeometrie und der Übertragungsfunktion des Prüftisches, eine nahezu beliebige vertikale Anregung. Begrenzt wird die realisierbare Frequenz durch

²³⁸ Vgl. IMV: Products

²³⁹ Vgl. Markert, R.: Skript zur Vorlesung Schwingungsmesstechnik, 2005

die Eigenschaften der verwendeten Rolle sowie durch die Geschwindigkeit des Schlittens. Dieser Aspekt wird anhand eines exemplarischen Beispiels (vgl. Abbildung 26) einer harmonischen Anregung mit der Beschleunigungsamplitude \hat{a}_z und einer Frequenz f dargelegt. Unter Annahme einer ideal starren Rolle ergibt sich die erforderliche Unebenheitshöhe zu:

$$\hat{z} = \frac{\hat{a}_z}{\omega^2} \quad (5.1)$$

Die daraus resultierende minimal darstellbare Periodenlänge L_{min} bzw. die minimale Geschwindigkeit v_{min} des Schlittens wird mithilfe von (5.2) bzw. (5.3) ermittelt.

$$L_{min} = 4r_{rad} \sin(\arccos(\frac{r_{rad} - \hat{z}}{r_{rad}})) \quad (5.2)$$

$$v_{min} = f L_{min} \quad (5.3)$$

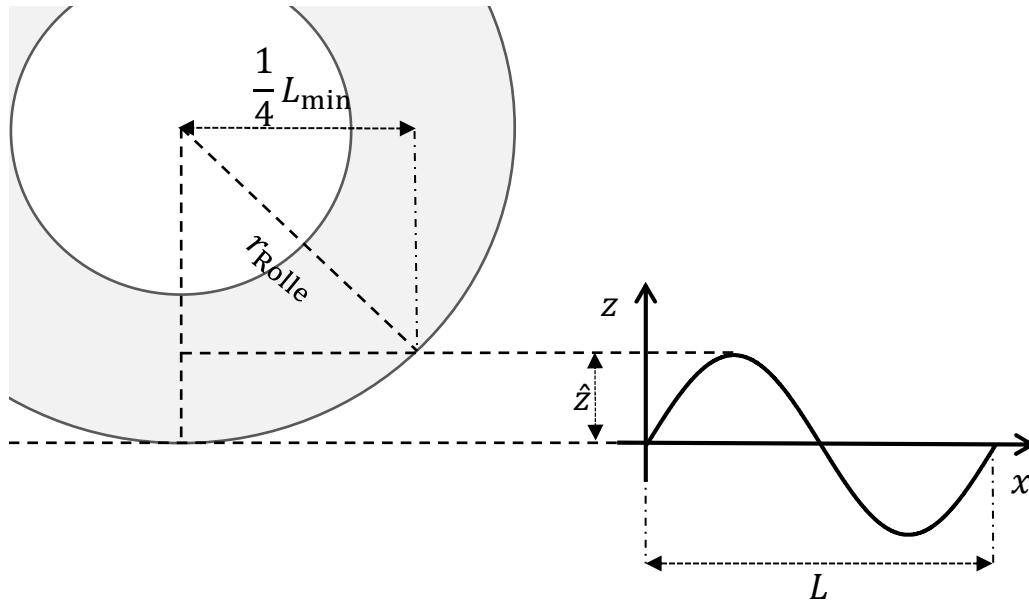


Abbildung 26: Grenzfrequenz bei der Anregung durch Unebenheiten

Mit den im Prüfstand montierten Stahlrollen mit einem Radius $r_{Rolle} = 31 \text{ mm}$, einer maximalen Beschleunigungsamplitude $\hat{a}_z = 9,81 \text{ m/s}^2$ und einer Frequenz von $f = 10 \text{ Hz}$, ist eine Unebenheitshöhe von $\hat{z} = 2,48 \text{ mm}$ erforderlich. Aufgrund der minimal darstellbaren Periodenlänge $L_{min} = 49 \text{ mm}$ wird hierfür eine minimale Schlittengeschwindigkeit $v_{min} = 0,49 \text{ m/s}$ benötigt. Resultierend aus dem quadratischen Zusammenhang zwischen Frequenz und Unebenheitshöhe, ergibt sich eine weitere Grenze für die maximal darstellbare Frequenz in der Fertigung der Anregungsprofile bzw. in deren Kosten. Eine Anregung mit 30 Hz bei $\hat{z} = 9,81 \text{ m/s}^2$ erfordert beispielsweise eine Un-

ebenheitshöhe von lediglich $\hat{z} = 0,28 \text{ mm}$. Allerdings ermöglicht die stoßartige Anregung bei Verwendung eines „kantigen“ Unebenheitenprofils auch im höherfrequenten Bereich eine breitbandige Anregung.

5.1.2.2 Führung des Prüftisches

Die horizontale Führung des Prüfschlittens erfolgt über ein Rollenschienenführungssystem. Angesichts der Darstellung der vertikalen Beschleunigungen darf dabei allerdings der vertikale Freiheitsgrad durch die Führungseinheit nicht gesperrt werden. Demnach ist eine vertikale Führung bzw. eine in vertikaler Richtung elastische Lagerung des Prüftisches erforderlich. Um einen zusätzlichen Führungsrahmen zu vermeiden und somit die erforderliche Antriebskraft zu vermindern, werden vier Führungseinheiten, bestehend aus jeweils einer Luftfeder und vier abgewinkelten Federblechen, verbaut. Diese Führungseinheiten sind zwischen Rollenschienenwagen und Prüftisch verbaut. (vgl. Abbildung 27).

Luftfedern ermöglichen im Gegensatz zu Elastomer- und Metallfedern eine Variation der Federrate und somit eine Anpassung an verschiedene Beladungszustände, ohne das hierfür zusätzliche Komponenten benötigt werden. Des Weiteren ermöglicht das Federungssystem, bestehend aus vier einzeln ansteuerbaren Balgzylindern, einen vollständigen statischen Neigungsausgleich, für den Fall, dass die Ladung nicht zentrisch positioniert wird.

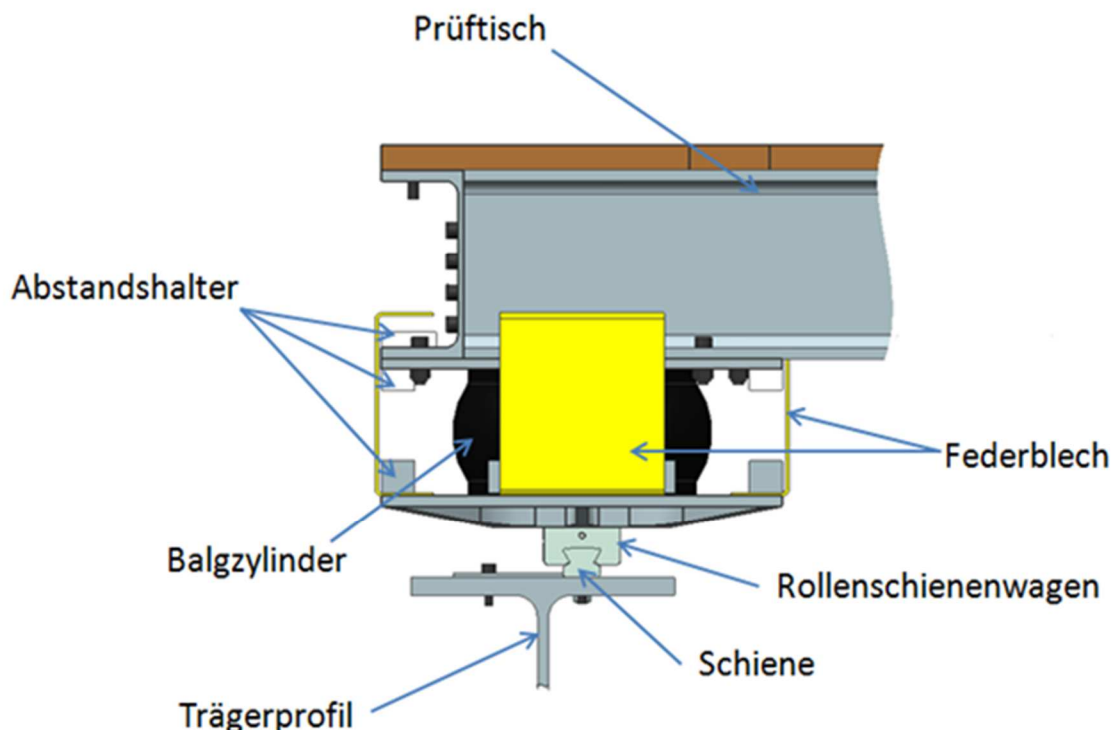


Abbildung 27: Führungseinheit von HULK

Die abgewinkelten Federbleche ermöglichen die Aufnahme von Zugbelastungen, die nicht von einer rein druckbelastbaren Luftfeder aufgenommen werden können. Sie stellen gleichzeitig eine für eine Luftfeder erforderliche Höhenbegrenzung dar und bewirken zudem eine signifikante Steigerung der Querfedersteifigkeit. Durch die Erhöhung der Querfedersteifigkeit steigt der beim Beladen tolerierbare laterale Schwerpunktversatz der Ladung auf dem Prüftisch.

Die Verwendung der beschriebenen elastischen Führungseinheit erlaubt neben der geforderten vertikalen Bewegung auch minimale Bewegungen in den restlichen fünf Freiheitsgraden: Je nach Montagegenauigkeit beträgt der horizontale Bewegungsspielraum ca. 5-20 mm. Die maximale Neigung des Prüftisches beträgt ca. 10° . Mit Verwendung der Balgzylinder als gesteuerte/geregelte vertikale Aktoren oder durch Ankopplung eines an der Startposition befindlichen, stationären Mehrachs-Schwingerregers²⁴⁰, wird hierdurch eine mechanisch-dynamische Vorkonditionierung des Ladungssicherungssystems ermöglicht.

Ferner wird durch den Verbleib der rotatorischen Freiheitsgrade das durch die Ladung am Prüftisch hervorgerufene Biegemoment nicht an die Führungsschienen weitergeleitet. Hierdurch können die Führungsschienen sowie die Rollenschienenwagen (vgl. Abbildung 27) kleiner dimensioniert werden.

5.1.3 Abbildung der horizontalen Beschleunigungen

Für den Antrieb von Beschleunigungsschlitten werden unterschiedliche Antriebssysteme verwendet. Für den Prüfstand wurde eine lineare hydraulische Antriebseinheit (Hydraulikzylinder) mit vorgeschaltetem Druckspeicher ausgewählt, da dieses System im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten eine sehr hohe Leistungsdichte sowie die Möglichkeit einer kostengünstigen Energiebevorratung bietet. Weitere Vorteile sind die guten Regelungseigenschaften sowie die Möglichkeit mit diesem System auch den Prüftisch zu verzögern. Durch den Einsatz von zwei entgegengesetzt arbeitenden ziehenden Hydraulikzylindern können die Antriebskomponenten (Zylinder, Regelungsventil, Speicher) deutlich kleiner dimensioniert werden als mit dem Einsatz eines doppelwirkenden Zylinders, da die Betrachtung der Knickung der Kolbenstange des Zylinders entfällt. Dies hat einen um den Faktor 3 geringeren Kolbenstangendurchmesser zur Folge und aufgrund der normierten Verhältnisse zwischen Kolbenstange und -fläche einen deutlich geringeren Volumenstrom. Mit einem Systemdruck von 200 bar in der Beschleunigungsphase und bis zu 250 bar beim Verzögern sowie einer effektiven Kolbenfläche von 1860 mm^2 sind Beschleunigungen von $9,3 \text{ m/s}^2$ und Verzögerungen bis zu $11,6 \text{ m/s}^2$ möglich.

²⁴⁰ Im aktuellen Ausbauzustand des Prüfstandes ist diese Funktion nicht umgesetzt

Aufgrund der oben beschriebenen Führungseinheit und den damit verbundenen Bewegungsfreiheitsgraden des Prüftisches besteht die Notwendigkeit, die zwei entgegengesetzt arbeitenden Hydraulikzylinder gelenkig bzw. flexibel mit dem Prüftisch zu verbinden. Dies wird durch die in Abbildung 28 dargestellte Anbindung realisiert.

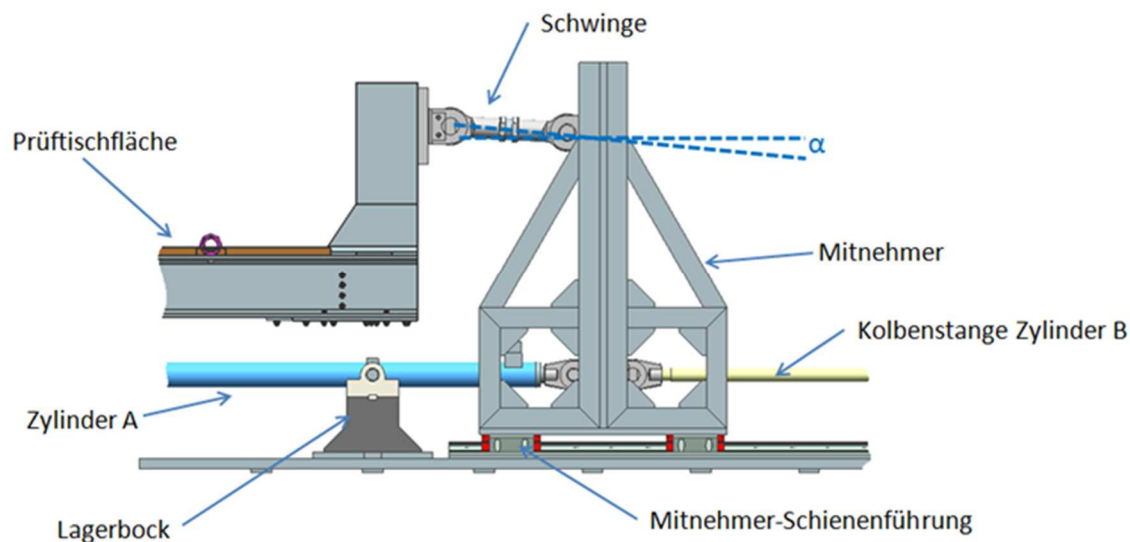


Abbildung 28: Anbindung der horizontalen Aktoren (ausgeblendetes Führungssystem des Prüfschlittens)

Die beiden Zylinder sind über Gelenklager mit einem schienengeführten Mitnehmer verbunden. Der Mitnehmer ist wiederum mit dem Prüftisch über eine gelenkig gelagerte Schwinge verbunden. Mit dem vertikalen Versatz zwischen dem Kraftangriffspunkt der Schwinge am Prüftisch und der Prüftischfläche ist eine Minimierung bzw. eine vollständige Kompensation des aus der Massenträgheit und dem erhöhten Gesamtschwerpunkt (Prüftisch und Ladung) resultierenden Nickmoments möglich. Begünstigt wird diese Kompensation zusätzlich durch den über die Niveauregulierung der Luftfedern einstellbaren Winkel α zwischen dem Prüftisch und der Schwinge. Durch Abstimmung der Federsteifigkeit und der Höhe der Balgzylinder, des vertikalen Versatzes zwischen Angriffspunkt der Schwinge und der Prüftischfläche auf die Masse und die Schwerpunktposition des beladenen Prüftisches sind definierte Drehbewegungen, wie sie bei realen Fahrmanövern auftreten (vgl. 4.2.1.3), darstellbar.

5.1.4 Aufnahme der Ladung

Die Maße der Prüftischfläche betragen in der Länge sowie in der Breite jeweils 2,5 m. Mit einer Nutzlast von insgesamt 30 kN besteht die Möglichkeit bis zu vier EU-Paletten (1,2 x 1 m²) gleichzeitig zu prüfen. Somit lassen sich in der Praxis übliche Sicherungsabteile, in denen vier Paletten gemeinsam gesichert werden, auch mit der Prüfvorrichtung untersuchen.

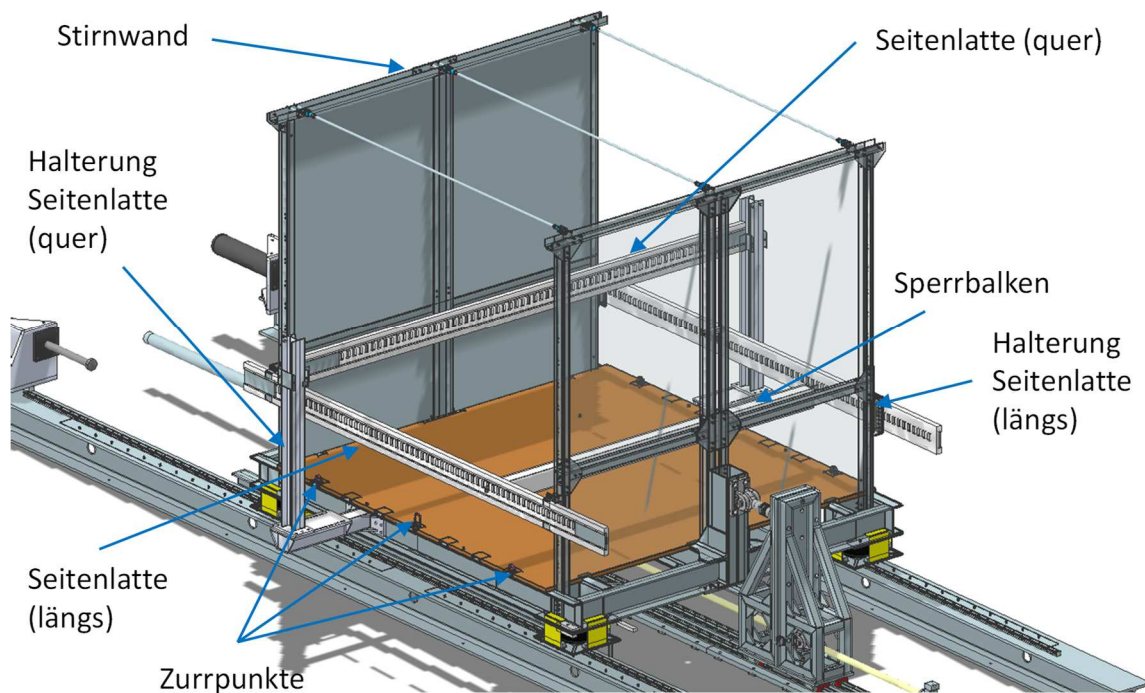


Abbildung 29: Anbringungsmöglichkeiten von Ladungssicherungseinrichtungen und Hilfsmitteln am Prüfschlitten

In Abbildung 29 sind die am Prüfschlitten anbringbaren Ladungssicherungseinrichtungen und -hilfsmittel dargestellt: Neben der Option Zurrgurte an den variabel positionierbaren Zurrpunkten zu befestigen, besteht die Möglichkeit, die Sicherung der Ladung über Seitenlatten oder Sperrbalken vorzunehmen. Die dafür entwickelten Halterungen sind in der Breite sowie in der Höhe einstellbar, so dass eine Anpassung an die verschiedenen Lkw-Aufbau-Hersteller erfolgen kann. Die Verwendung von mehreren Haltern ermöglicht, wie im Lkw, die Sicherung über mehrere Sperrelemente gleichzeitig (beispielsweise zwei oder drei Seitenlatten). Mithilfe der quer montierten Seitenlatten, den variablen Zurrpunkten und einer 90°-Rotation der Ladung, sind die Ladungssicherungssysteme auch hinsichtlich lateraler Lastfälle (Kurvenfahrt, Ausweichmanöver, etc.) bewertbar. Eine gleichzeitige Darstellung von lateralen und longitudinalen Beschleunigungsverläufen (z.B. Bremsen in Kurven) ist nicht möglich.

5.2 Messsysteme

Die Betriebssicherheit eines Ladungssicherungssystems ist nach Kapitel 3.2 anhand der Verschiebung des Ladungsschwerpunktes sowie des Impulsaustausches bzw. der Kraftabstützung zwischen Ladung und Fahrzeug zu bewerten. Die Verschiebung des Ladungsschwerpunktes resultiert dabei aus der Bewegung der Ladung, die für die Bewertung des genannten Kriteriums zu erfassen und auszuwerten ist. Der Impulsaustausch/die Kraftabstützung zwischen der Ladung und dem Fahrzeug erfolgt über die Ladefläche und vor allem über die Ladungssicherungshilfsmittel und -einrichtungen. Bei Vernachlässigung der Ladefläche²⁴¹ ist dieses Kriterium demnach über die Reaktionen der Sicherungsmittel und -einrichtungen bewertbar.

Für diese zwei verschiedenen Messaufgaben wurden im Rahmen von, vom Verfasser dieser Dissertation initiierten und betreuten studentischen Arbeiten, Messsysteme entwickelt, auf die im Folgenden eingegangen wird.

5.2.1 Ladung/Ladeeinheit

Die Bewegung der Ladung setzt sich aus deren Verformung, Translation sowie Rotation zusammen. Um bei der Aufnahme dieser Größen eine Beeinflussung des Ladungsverhaltens auszuschließen, sind berührungslose Messprinzipien zielführend. Im Gegensatz zur Streifenprojektion oder zu Laserscannern, sind bei der Anwendung der Photogrammetrie lediglich passive Sensoren erforderlich. Aus mehreren Bildern (zeitlich und/oder örtlich verschoben) lassen sich Informationen über die zeitliche und/oder örtliche Lage von markanten Bildpunkten extrahieren. Hiermit lassen sich bei vergleichsweise einfacher Handhabung²⁴² dynamische Vorgänge wie beispielsweise Verformungen und Verschiebungen sehr gut darstellen²⁴³.

Für die Messung der Ladungsbewegung kommen handelsübliche GoPro Hero 3 Kameras zum Einsatz, die eine Aufnahmerate von bis zu 240 Bildern pro Sekunde ermöglichen. Aufgrund ihres eigentlichen Einsatzbereiches im Freizeit/Outdoor-Bereich, ist dieses Kamerasystem für die Anwendung in einer staubigen und vibrationsreichen Umgebung, wie sie im Allgemeinen bei der Untersuchung von Ladungssicherungssystemen anzutreffen ist, gut geeignet. Daher besteht die Möglichkeit, dieses System nicht nur an Prüfständen, sondern auch auf einem Lkw bei Vergleichsuntersuchungen einzusetzen.

²⁴¹ Bei Kenntnis der Reibverhältnisse zwischen der Ladung und Ladefläche, besteht die Möglichkeit die daraus resultierende Kraftabstützung mithilfe der Bewegung der Ladung zu ermitteln

²⁴² Bei einer zweidimensionalen Messung wird lediglich ein handelsübliches Kamerasystem benötigt

²⁴³ Vgl. Keferstein, C. et al.: Fertigungsmesstechnik, 2015, S. 195 f

Je nach Untersuchungszweck kommen eine oder mehrere Kameras zum Einsatz: Für eine zweidimensionale Aufnahme wird lediglich ein Kamerasystem benötigt. Ein Zusammenschluss von zwei Kameras zu einem Stereosystem ermöglicht die dreidimensionale Erfassung der im Bildbereich liegenden Ladungsoberfläche. Ein Zusammenschluss von vier Stereosystemen ermöglicht eine 360° Aufnahme der Ladung (vgl. Abbildung 30).

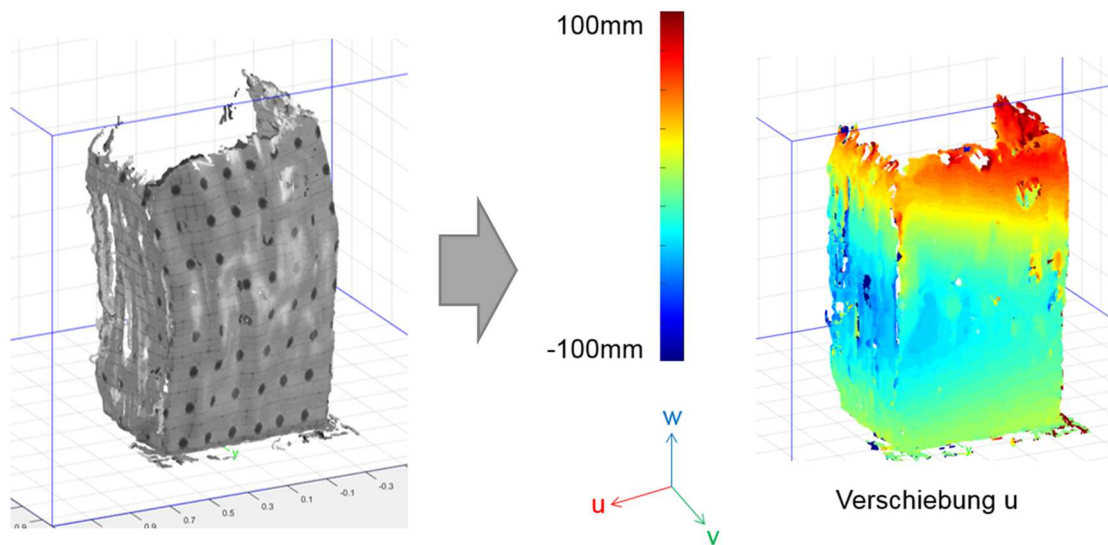


Abbildung 30: 270° Abbildung der Verformung einer Weichladung (Flexible Intermediate Bulk Container) durch Zusammenschluss von drei Stereokamerasystemen²⁴⁴

Für die Auswertung der Ladungsbewegung werden zwei unterschiedliche Methoden eingesetzt, die in ihren jeweiligen Ausbaustufen unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen:

Die Methode 1 extrahiert mit Hilfe des TheoryWarping-Algorithmus²⁴⁵ direkt den optischen Fluss (Bewegung im Bild) für jeden Pixel. Hierdurch ist theoretisch eine vollständige Abtastung der Ladung möglich²⁴⁴.

Die Methode 2 hingegen extrahiert mit Hilfe von Schwellwertoperationen²⁴⁶ für jedes aufgenommene Bild die Positionen künstlich aufgebrachter, diskreter Marker. Aus den einzelnen Positionen in den zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Bildern, ist auf die Bewegung der Ladung zu schließen. Die Bewegungsanalyse ist auf die diskreten Messtellen (Marker) beschränkt. Sie weist allerdings im Vergleich zur Umsetzung der Methode 1 eine höhere Genauigkeit auf: $\pm 2,5$ mm im Gegensatz zu ± 10 mm und wird daher im weiteren Verlauf angewendet.

²⁴⁴ Vgl. Gebauer, O.: Entwicklung und Inbetriebnahme eines optischen 3D-Messsystems, 2016

²⁴⁵ Vgl. Brox, T. et al.: High Accuracy Optical Flow, 2004, S. 26 ff

²⁴⁶ Definierte Farbwerte und Muster werden erkannt

5.2.2 Ladungssicherungshilfsmittel und -einrichtungen

Die Ermittlung des Impulsaustausches zwischen der Ladung und dem Sicherungsmittel erfolgt indirekt über die Kräfte, die von der Ladung auf die Sicherungsmittel wirken. Bei Zurrmitteln (Gurte, Ketten, Drahtseile) werden hierfür handelsübliche Kraftsensoren verwendet, die zwischen Zurrpunkt/Anschlagpunkt am Prüfschlitten und dem Zurrmittel befestigt werden. Die Ermittlung der Reaktionskräfte von Seitenlatte oder Sperrbalken erfolgt indirekt über die Messung ihrer Dehnung an diskreten Messpunkten über Dehnmessstreifen (DMS). Die Dehnung der formschlüssigen Sicherungselemente gibt dabei allerdings lediglich Aufschluss über die Beanspruchung an diesen diskreten Messstellen. Die Anzahl sowie die Verteilung der Messstellen ist an das Ladungsverhalten bzw. an den Kenntnisstand über das Ladungsverhalten anzupassen. Je weniger über das Ladungsverhalten bekannt ist, umso mehr Messpunkte sind erforderlich: Für annähernd starre Ladungen bzw. Ladungen, deren Steifigkeit um ein Vielfaches höher ist als die des Sicherungselementes, sowie einer Beanspruchung im rein elastischen Bereich sind unter Zuhilfenahme der Balkentheorie lediglich zwei Messstellen, links und rechts am Sperr-element außerhalb der Ladung, ausreichend. Bei „weichen“ stark inhomogenen Ladungen bedarf es, ohne validierte Modellannahmen, einer kontinuierlichen Dehnungsmessung des Balkens im Bereich der Belastung, um den Verlauf der Flächenlast zu erfassen²⁴⁷.

5.3 Konzeptverifikation und -validierung

Angesichts der enormen Vielfalt an Ladungstypen und Sicherungsmitteln ist im Einzelfall zu prüfen, ob das entwickelte Testwerkzeug mit den spezifizierten Lastfällen hinreichend für die Zertifizierung des speziellen Ladungssicherungssystems ist. Darüber hinaus besteht weiterhin Bedarf an wissenschaftlich abgesicherten Daten zu repräsentativen Transportbelastungen, anhand derer repräsentative Lastkollektive abgeleitet werden können. Aufgrund dessen wird im Folgenden lediglich das Konzept des Testwerkzeugs, insbesondere der Vorrichtung zur Darstellung der relevanten Transportbelastungen (HULK), hinsichtlich der Eignung zu Untersuchung von Ladungssicherungssystemen überprüft. Hierfür sind über folgende Aspekte Aussagen zu treffen:

- Reproduzierbarkeit
- Wirkung der vertikalen Transportbelastungen

²⁴⁷ Vgl. Reinicke, T.: Systems zum Messen von Belastungen von Ladungssicherungsmaßnahmen, 2016

5.3.1 Versuchsaufbau

Die Eignung des Testwerkzeugs wird anhand zweier Versuchsreihen untersucht. Als Ladegut in beiden Versuchsreihen wird ein „starres“ Metallgerüst (Masse $m = 250$ kg, Höhe = 940 mm, Länge = Breite = 1260 mm) verwendet, das ohne Palette auf die Lade­fläche des Prüfschlittens (Siebdruckboden) an der hinteren Stirnwand positioniert wird (vgl. Abbildung 31).

Bei der ersten Versuchsreihe erfolgt keine Sicherung der Ladung. Erfasst wird neben der Beschleunigung des Prüfschlittens die Verschiebung der Ladung. Bei der zweiten Versuchsreihe wird die Ladung mit Hilfe eines Sperrbalkens gesichert. Zwischen Ladung und Sperrbalken ist eine Ladelücke von 2,5 cm vorhanden. Erfasst werden die Verformung des Balkens sowie die Beschleunigung. Beide Versuchsreihen werden mit demselben horizontalen Beschleunigungsprofil (vgl. Anhang A.5), jeweils fünfmal ohne und fünfmal mit zusätzlicher vertikaler Anregung, durch Überfahren eines Unebenheitenprofils²⁴⁸ durchgeführt.

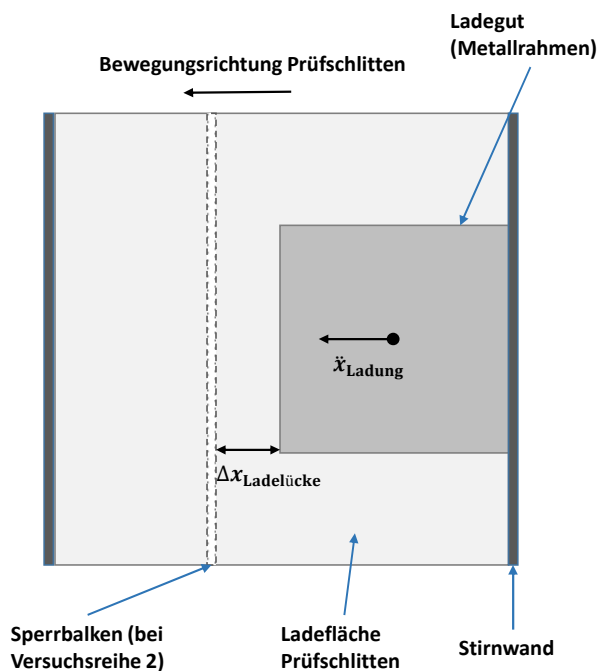


Abbildung 31: Versuchsaufbau

²⁴⁸ Die technischen Maße des Profils sind im Anhang A.5 aufgeführt.

5.3.2 Transportbelastungen und ihre Reproduzierbarkeit

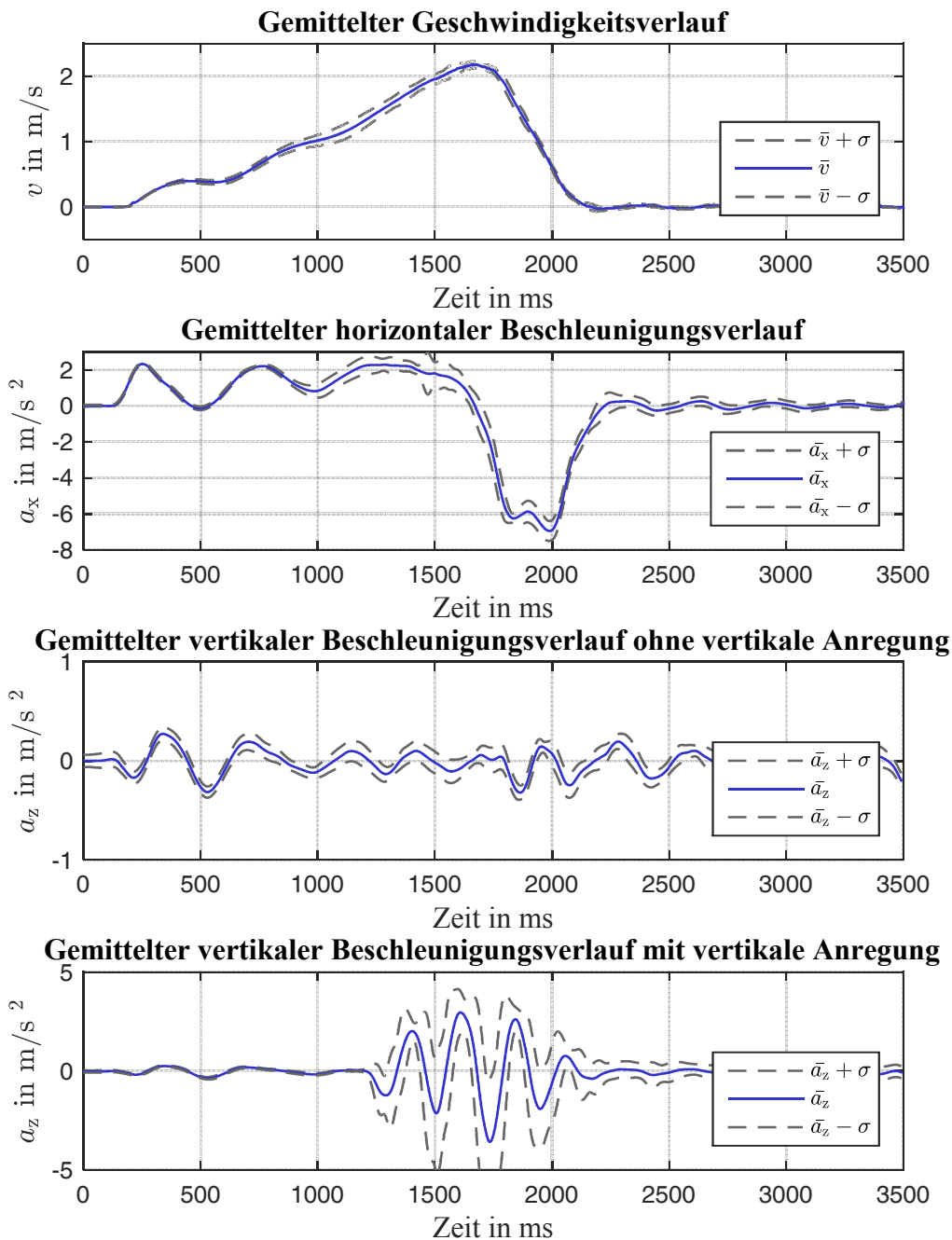


Abbildung 32: Gemittelte Versuchsergebnisse (Messstelle: Schlitten/Ladefläche Mitte): Geschwindigkeitsverlauf (alle Versuche); horizontaler Beschleunigungsverlauf (alle Versuche); vertikaler Beschleunigungsverlauf (ohne zusätzliche vertikale Anregung); vertikaler Beschleunigungsverlauf (mit vertikaler Anregung, in einer anderen Skalierung)

In Abbildung 32 sind die gemittelten Verläufe für die Geschwindigkeit, die horizontale Beschleunigung, die vertikalen Beschleunigungsverläufe (mit und ohne vertikaler Anregung) sowie die zugehörige Standardabweichung dargestellt. Während der Beschleunigungsphase erreicht der Prüfschlitten eine maximale Geschwindigkeit von $\bar{v}_{\max} = 2,22 \pm 0,05$ m/s. In der anschließenden Verzögerungsphase wird dieser mit durchschnittlich $\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}} = -4,64 \pm 0,21$ m/s² in 471 ± 28 ms bis zum Stillstand abgebremst: Die Beschleunigung wird dabei mit $\bar{a}_x = -34,85 \pm 2,18$ m/s³ aufgebaut. Gefolgt von einer “annähernd konstanten“ Prüfbeschleunigung $\bar{a}_{x,\text{Prüf}} = -5,92 \pm 0,23$ m/s² über 315 ± 28 ms. Im Folgenden werden die Verläufe der einzelnen Phasen näher beschrieben.

Die Abbildung 32 zeigt in der Beschleunigungsphase einen schwingenden Kurvenverlauf mit einer maximalen Amplitude von $2,3$ m/s². Nach Expertenmeinung²⁴⁹ sind diese Schwingungen vermutlich auf Druckschwingungen²⁵⁰ im Hydrauliköl sowie auf die Flexibilität der Hydraulikleitungen zurückzuführen. Aufgrund der Verwendung eines Regelventils für beide Zylinder besteht bei dem umgesetzten System nicht die Möglichkeit, die Zylinder gegeneinander vorzuspannen, um den Einfluss der flexiblen Leitungen zu kompensieren. Die vergleichsweise geringe Beschleunigung stellt in der betrachteten Systementwicklungsstufe das Maximum dar. Hiermit sind demnach noch keine Beschleunigungsverläufe simulierbar, die einem Ausweichmanöver oder einem doppelten Fahrstreifenwechsel entsprechen. Dies liegt vornehmlich an den teilweise noch vorhandenen scharfkantigen Querschnittsübergängen im Hydrauliksystem²⁵¹.

Der über die Schwellzeit gemittelte Beschleunigungsgradient von $34,85 \pm 2,18$ m/s³ entspricht der Zielvorgabe. Eine Steigerung oder Absenkung ist durch Anpassung der Sollvorgabe am hydraulischen Regelventil möglich. Nach oben ist dies durch die Ansprechzeit des Ventils begrenzt. Eine weitere obere Begrenzung liegt in dem zeitlich folgenden Verlauf der Beschleunigung: Durch ein „schnelles“ Öffnen oder Schließen des Ventilquerschnitts entstehen Druckschwingungen im Öl, die den nachfolgenden Beschleunigungsverlauf beeinflussen. Eine Auflösung bzw. Minderung dieser Problematik ist durch einen Öl-Schwingungsdämpfer möglich.

Die über die Verzögerungsphase gemittelte Prüfbeschleunigung von $|\bar{a}_{x,\text{Prüf}}| = 5,92 \pm 0,23$ m/s² sowie die Verzögerungsdauer von 315 ± 18 ms entsprechen den Zielvorgaben des Versuchs. Die Höhe der maximalen Beschleunigung in der

²⁴⁹ Expertengespräch mit Paul Taubert, M.Sc. (Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik an der TU Darmstadt)

²⁵⁰ Ein Öl-Schwingungsdämpfer ist im System nicht verbaut

²⁵¹ Hiervon betroffen ist hauptsächlich das zugekaufte Hochdruckspeichersystem

Verzögerungsphase ist durch den maximal zulässigen Systemdruck von 250 bar²⁵² begrenzt. Mit einer effektiven Kolbenfläche von 1860 mm² sind damit Verzögerungen von 11,6 m/s² bei einer Gesamtmasse von 4 t möglich²⁵³. Eine Ausdehnung der Verzögerungsdauer, insbesondere bei der Darstellung höherer Verzögerungen, ist abhängig von der maximalen Geschwindigkeit während der Beschleunigungsphase und dem zur Verfügung stehenden Fahrweg (3,3 m). Die in den Versuchen erzielte Prüfbeschleunigung ist nicht konstant und weist eine Standardabweichung von 0,66 m/s² auf. Ursächlich hierfür ist neben der bereits erwähnten Problematik der Druckschwingungen auch das vorhandene Optimierungspotenzial bei der verwendeten Regelstruktur (Regelung der Geschwindigkeit durch Anpassen des Durchflussquerschnitts mit einem PID-Regler und Vorsteuerung) und den verwendeten Regelparametern. Der für diese Arbeit verwendete Regler ist nicht darauf abgestimmt, den Einfluss auf die horizontale Beschleunigung durch das Überfahren von Bodenunebenheiten zu kompensieren.

Bei den Versuchen mit vertikaler Anregung liegt der Effektivwert der daraus resultierenden Beschleunigung bei $2,57 \pm 0,55$ m/s². Das Überfahren der Unebenheiten resultiert in einer überwiegend periodischen vertikalen Beschleunigung mit den Frequenzen von 4,8 Hz sowie 8,8 Hz. Die Form des resultierenden Beschleunigungsprofils ist über das Anregungsprofil gestaltbar. Prinzipbedingt ist der Zeitpunkt sowie die Höhe der Amplitude der vertikalen Beschleunigung von der Bewegung des Schlittens, dessen Startposition (relativ zum Anregungsprofil) sowie von der Höhe der Laufrolle über dem Bodenprofil abhängig. Die Standardabweichung von $\pm 0,55$ m/s² ist durch Abweichungen in diesen drei Parametern zwischen den einzelnen Versuchen zu erklären. Daraus resultiert ein Optimierungsbedarf hinsichtlich der Höhenregelung, der Positionsregelung bei der Rückfahrt auf die Startposition sowie der Geschwindigkeitsregelung während der einzelnen Versuche.

²⁵² Bei 250 bar öffnen die Überdruckventile

²⁵³ Bei Voruntersuchungen wurden bisher kurzzeitige Verzögerungen von bis zu 16,9 m/s² bei 2,5 t Gesamtmasse erreicht (siehe Anhang A7)

5.3.3 Messergebnisse

Tabelle 6: Messergebnisse der beiden Versuchsreihen

Messergebnisse	Ohne Sicherung Verschiebung in mm	Mit Sicherung Resultierende Kraft in N	$\bar{a}_{x, \text{Verzögerung}}$ in m/s^2
Ohne vertikale Beschleunigung	$583,9 \pm 5,6$	3339 ± 55	$4,70 \pm 0,04$
Mit vertikaler Beschleunigung	$683,7 \pm 1,3$	3982 ± 211	$4,58 \pm 0,29$

In Tabelle 6 sind die Messergebnisse der beiden Versuchsreihen dargestellt. Die Versuche mit vertikalen Beschleunigungen durch das Überfahren von Unebenheiten weisen um 17 % höhere Werte bei der Verschiebung bzw. 19 % höhere Werte bei den resultierenden Kräften in dem formschlüssigen Sicherungselement (Sperrbalken) auf. Der Unterschied für beide Versuchsreihen ist hoch signifikant²⁵⁴. Diese Ergebnisse bestätigen die in Kapitel 2.4 beschriebene Relevanz der vertikalen Vibrationen auf Ladungssicherungssysteme und damit die Notwendigkeit die vertikalen Transportbelastungen bei der Auslegung, der Untersuchung und der Zertifizierung von Ladungssicherungssystemen zu berücksichtigen.

5.4 Fazit und Diskussion zu den Ergebnissen

Gegenstand dieses Kapitels ist die technische Umsetzung eines Prüf- und Bewertungsverfahrens für Ladungssicherungssysteme, bestehend aus einer Vorrichtung zum Darstellen der in Kapitel 4 abgeleiteten relevanten Transportbelastungen und Systemen zum Erfassen der erforderlichen in Kapitel 2 abgeleiteten Bewertungsgrößen.

Das Abbilden der relevanten horizontalen, vertikalen und rotatorischen Transportbelastungen wird durch die Kombination eines horizontalen Beschleunigungsschlittens mit einem speziellen Führungssystem, das definierte Bewegungen in allen Freiheitsgraden zulässt, realisiert. Die Bewegung der Ladung wird mittels eines variablen photogrammetrischen Systems erfasst, bestehend aus einer oder mehrerer handelsüblicher Kameras.

²⁵⁴ Mithilfe des Zweistichproben-t-Test wird ein Signifikanzniveau für die Versuche ohne Sicherung von $p = 5 \cdot 10^{-3}$ und mit Sicherung von $p = 1,6 \cdot 10^{-4}$ ermittelt.

Der Impulsaustausch bzw. die Kraftabstützung zwischen der Ladung und dem „Transportfahrzeug“ (Prüf Schlitten) wird anhand der resultierenden Kräfte in den Rückhaltesystemen ermittelt. Aufgrund ihrer Ausführung sind die entwickelten Messsysteme auch für den Einsatz im Lkw geeignet. Hierdurch besteht die Möglichkeit, diese für zukünftige Vergleichsuntersuchungen sowohl für der Prüfvorrichtung als auch reale Fahrversuchen zu verwenden. Die erforderliche Messgenauigkeit und –auflösung ist an den jeweiligen Untersuchungszweck anzupassen und erfordert möglicherweise eine Substitution der Messmittel durch kommerzielle Systeme. Um den Informationsgewinn aus den einzelnen Prüfläufen zu steigern, ist eine Synchronisation der Prüfstandsdaten (Transportbelastungen) mit denen der Messwerkzeuge erforderlich. Beispielsweise wäre somit detektierbar, bei welcher Beschleunigung die Ladung in Bewegung versetzt wird und mit welcher relativen Beschleunigung sich diese im Vergleich zum Prüf Schlitten bewegt. Hieraus ließen sich Schlüsse über die Reibung ziehen.

Die Ergebnisse der beiden durchgeführten Versuchsreihen mit einer ungesicherten und gesicherten Ladung zeigen Optimierungsbedarf an der Prüfvorrichtung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Lastfälle auf. Die Standardabweichung der horizontalen Beschleunigung in der Verzögerungsphase von $0,66 \text{ m/s}^2$ übersteigt den in der DIN 12642 definierten Toleranz von $0,49 \text{ m/s}^2$. Durch Anpassungen der Regelstruktur und Verbesserungen am Hydrauliksystem besteht die Möglichkeit, diese Problematik zukünftig aufzulösen. Die, durch das Überfahren von periodischen Unebenheiten resultierende, periodische vertikale Transportbelastung dient zur Darstellung der prinzipiellen Eignung des Anregungskonzeptes. Die Unebenheiten sind auf repräsentative vertikale Lastkollektive in Abhängigkeit der vertikalen Übertragungsfunktion des Prüf Schlittens abzustimmen, sobald solche Kollektive vorhanden sind.

Trotz der oben genannten Einschränkungen zeigen die Messergebnisse der Versuchsreihen den hoch signifikanten Unterschied im Verhalten des Ladungssicherungssystems zwischen den Versuchen mit und ohne vertikaler Transportbelastung unter Berücksichtigung der gesamten Verzögerungsphase. Eine Darstellung dieser vertikalen Vibrationen ist demnach für eine umfassende Untersuchung des Verhaltens von Ladungssicherungssystemen erforderlich. Aus der Möglichkeit diesen Unterschied mit der entwickelten Prüfvorrichtung darzustellen, wird die grundsätzliche Eignung des Vorrichtungskonzeptes abgeleitet. Für eine Verwendung als Untersuchungs- und Zertifizierungswerkzeug sind die bereits angesprochenen Anpassungen vorzunehmen und Vergleichsuntersuchungen mit realen Fahrversuchen durchzuführen.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Trotz der essentiellen ökonomischen Bedeutung der Transportwirtschaft für Europa, insbesondere für Deutschland, und trotz der schwerwiegenden Folgen mangelhafter Ladungssicherung für die Verkehrssicherheit ist ein gravierendes Forschungsdefizit im Bereich der Ladungssicherung festzustellen. Bei der Evaluation von Ladungssicherung sowie größtenteils bei den angewandten Sicherungsmitteln selbst wird teilweise auf über 25 Jahre alte Methoden zurückgegriffen. Diese sind den wachsenden Herausforderungen hinsichtlich der Transporteffizienz nicht mehr gewachsen, da sie, wie die Analyse der bekannten Verfahren zeigt, keine umfassende wissenschaftliche Analyse dieser Systeme gewährleisten und somit keine ökonomische und sicherheitstechnische Optimierung dieser ermöglichen: Die erfahrungsbasierten Methoden sind subjektiv und leisten somit keinen objektiven Beitrag. Die modellbasierten Verfahren weisen großes Potential auf Ladungssicherungssysteme effizient auszulegen und zu bewerten, jedoch scheitern sie an einer fehlenden Validierung. Dies ist wiederum auf einen Mangel an geeigneten experimentellen Methoden zurückzuführen. Die reproduzierbaren Untersuchungsmethoden im Labor mithilfe von Prüfvorrichtungen simulieren die Transportbelastungen nur unzureichend. Die im Bereich der Ladungssicherungsprüfung als Benchmark angesehenen Fahrversuche weisen in der aktuell angewandten Form nach DIN EN 12642 gravierende Schwächen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit auf. Diesem Umstand kann nur entgegengetreten werden, indem der ohnehin schon beträchtliche Aufwand bei der Durchführung durch striktere Definitionen der Fahrzeugwahl, der Ladegutposition sowie der Fahrmanöver erheblich gesteigert wird.

Der Stand der Technik zeigt weiterhin auf, dass für die Entwicklung eines generischen Prüf- und Bewertungsverfahrens drei grundlegende aufeinander aufbauende Fragestellungen zu beantworten sind:

- Welche allgemeinen technischen Anforderungen ergeben sich an Ladungssicherungssysteme?
- Welche Transportbelastungsparameter sind für die Evaluation von Ladungssicherungssystemen relevant und welche Auswirkungen haben diese auf die identifizierten Anforderungen?
- Wie sind die identifizierten Anforderungen anhand der relevanten Transportbelastungsparameter im Labor überprüfbar?

Unter Anwendung der Fehlerbaumanalyse werden die Ursachen ermittelt, die zu einer Gefährdung der Betriebs- und Beförderungssicherheit führen, also zu einer Gefährdung

der Verkehrssicherheit und der Ladegüter. Diese Ursachen zeigen auf, welche technischen Anforderungen an Ladungssicherungssysteme zu stellen sind. Aufgrund der enormen Vielfalt an unterschiedlichen Ladegütern ist für die Beförderungssicherheit als universell gültige Anforderung lediglich abzuleiten, dass die Beanspruchbarkeit der Ladung größer sein muss als die Beanspruchung durch den Transport und den Güterumschlag. Weitere Konkretisierung sind ladegutspezifisch und erfordern entsprechende Angaben vom Hersteller oder durch Normen, sofern solche Angaben überhaupt vorhanden sind. Andernfalls sind retrospektive Schadensanalysen erforderlich. Die Gefährdung der Betriebssicherheit ist auf eine Grundursache zurückzuführen, die Bewegung der Ladung. Anstatt wie in der StVO die kaum umsetzbare Forderung einer nicht bewegenden Ladung zu stellen, werden in Kapitel 3 die Wechselwirkungen zwischen Transportfahrzeug und Ladungssicherungssystem analysiert. Eine Gefährdung der Verkehrssicherheit tritt nur auf, sobald die Verschiebung des Ladungsschwerpunktes und/oder der Impulsaustausch bzw. die Kraftabstützung zwischen Ladung und Fahrzeug fahrzeugspezifische Grenzwerte überschreiten. Anhand des statischen Stabilitätsfaktors und des Lastverteilungsplans ist die zulässig laterale und longitudinale Schwerpunktverschiebung der Ladung ermittelbar. Des Weiteren wird erstmals eine analytische Methode aufgezeigt, mit der zulässige Ladelücken in Abhängigkeit der Fahrzeugeigenschaften, der Ladung sowie des formschlüssigen Sicherungselementes zu berechnen sind. Da es sich allerdings bei den hierfür verwendete Modelle um quasi-statische Vereinfachungen handelt, ist durch praktische Vergleichsuntersuchungen zukünftig zu prüfen, inwieweit sie hierfür geeignet sind bzw. welche Sicherheitsfaktoren anzuwenden sind. Trotz der analytischen Ansätze ist der für die Lösung zu erbringende Aufwand nicht unerheblich. Für einen durchschnittlichen Lkw-Fahrer erscheint er ohne zusätzliche technischen Hilfsmittel, die die Berechnung übernehmen, unzumutbar. Insbesondere da eine Teilbeladung oder eine Teilentladung eine Neuberechnung erfordern.

Die Grundvoraussetzung für die Auslegung von Ladungssicherungssystemen ist die Kenntnis über die wirkenden Transportbelastungen. Mithilfe von Literaturangaben, analytischen Berechnungen und numerischen Fahrdynamiksimulationen werden die relevanten Transportbelastungen identifiziert und für die Auslegung einer entsprechenden Prüfvorrichtung unter Annahme von Worst-Case-Szenarien quantifiziert. Hierbei ist hervorzuheben, dass neben den horizontalen Beschleunigungen auch vertikale sowie Drehbeschleunigungen zu berücksichtigen sind. Weiterhin sind die im realen Verkehrsgeschehen auftretenden Charakteristika – Richtung, Amplitudenhöhe, Dauer, Schwellzeit, Anzahl der Nulldurchgänge der jeweiligen Beschleunigung sowie die Häufigkeit der Belastung und die allgemeine Vorgeschichte der Ladegüter mit einzubeziehen. Die Kombination der einzelnen Grenzbelastungen ergibt allerdings ein Lastkollektiv, das so in der Realität nicht auftreten wird. Für die Auslegung eines repräsentativen und relevanten Lastkollektivs sind statistische und wissenschaftlich abgesicherte Datenerhebungen notwendig, die zum Zeitpunkt dieser Arbeit allerdings nicht öffentlich zur Verfügung stehen.

Die Analyse der Transportbelastungen zeigt jedoch auf, dass die auftretenden Belastungen abhängig vom Verhalten des Ladungssicherungssystems sind. Demnach ist das Optimum für die Auslegung von Ladungssicherung zwischen sicherheitstechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten nur unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Ladung, Sicherungsmittel und Transportfahrzeug möglich.

Die Darstellung der abgeleiteten Grenzfälle der Transportbelastungsparameter wird anhand eines horizontal verfahrenenden Beschleunigungsschlittens dargestellt. Durch die Verwendung eines speziellen Führungssystems sowie einer entsprechenden Anregung wird der Bewegungsraum um die anderen fünf Freiheitsgrade, insbesondere dem vertikalen, erweitert. Der horizontale Vortrieb erfolgt hydraulisch. Die horizontale Bewegung wird dabei mit Hilfe von mehreren Führungsrollen und einem entsprechenden Bodenprofil teilweise in eine vertikale Bewegung umgewandelt. Mit der Abstimmung einzelner Vorrichtungssparameter (Federsteifigkeit und Höhe der Luftbälge, Höhe der Anbindung der horizontalen Aktorik) auf die Lage des Gesamtschwerpunktes ist zusätzlich die Darstellung definierter Drehbewegungen des Prüfschlittens möglich. Dieses hydraulische Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK) vereint somit die Untersuchungsmöglichkeiten eines Beschleunigungsschlittens mit denen eines mehrachsigen Vibrationstisches. Durch die Integration von Messsystemen zur Erfassung der Bewegung der Ladung sowie zur Detektion der Kraftabstützung zwischen Ladung und Sicherungsmitteln entsteht ein vollwertiges Testwerkzeug für die Prüfung und Bewertung von Ladungssicherungssystemen.

Die Ergebnisse der Versuche mit einer nicht gesicherten Ladung sowie mit einer durch formschlüssige Elemente gesicherten Ladung zeigen auf, dass das entwickelte Konzept für die Evaluation von Ladungssicherungssystemen geeignet ist. Im speziellen verdeutlichen sie den hoch signifikanten Einfluss der vertikalen Vibrationen auf das Verhalten der Ladung bzw. auf die notwendigen Sicherungskräfte. Anhand der Ergebnisse wird allerdings auch noch Optimierungsbedarf an dem Testwerkzeug aufgedeckt. Für eine umfassende Untersuchung von Ladungssicherungssystemen besteht die Notwendigkeit, die verwendeten Reglerstrukturen und -parameter zu überarbeiten, die vertikale Anregung anhand der vertikalen Übertragungsfunktion an einen definierten Lastfall anzupassen sowie die verwendeten Messsysteme zu optimieren. Um den Informationsgewinn aus den Untersuchungen zu steigern, ist insbesondere eine Synchronisation zwischen den Daten des Prüfstandes und denen der Messsysteme erforderlich. Neben den Untersuchungsmöglichkeiten besteht die Möglichkeit, das entwickelte Testwerkzeug auch als Testverfahren für die Zertifizierung von Ladungssicherungssystemen zu verwenden. Hierzu sind zunächst allerdings weitere Untersuchungen notwendig. Die Erstellung von zertifizierungsgerechten Lastkollektiven erfordert neben einer statistisch abgesicherten, repräsentativen Datengrundlage der Transportbelastungen für das normale Verkehrsgeschehen auch

A-priori-Kenntnisse über die Wirkung der einzelnen und kombinierten Transportbelastungen, die in Voruntersuchungen mit beispielsweise dem entwickelnden Testwerkzeug durchzuführen sind.

6.2 Ausblick

Nach Abschluss der in Abschnitt 6.1 notwendigen Tätigkeiten steht ein Test- und Zertifizierungswerkzeug zur Verfügung, das auch für Schulungsmaßnahmen für Ladungssicherungssachverständige und Kontrollbehörden genutzt werden kann. Ein solches experimentelle Testwerkzeug eignet sich unter ökonomischen Gesichtspunkten allerdings lediglich für die Darstellung ausgewählter Arbeitspunkte/Lastkollektive mit einer eingeschränkten Anzahl an Ladungssicherungssystemen. Im Hinblick auf die immense Vielfalt an Ladungen und Transportfahrzeugen, ist ein derartiges Vorgehen nicht praktikabel. Diese Problematik ist anhand von virtuellen Prüf- und Bewertungsverfahren aufzulösen. Grundvoraussetzung hierfür ist zum einen die Kategorisierung der Vielzahl an Ladungen in bestimmte Klassen und zum anderen die mathematische Modellierung ihres Verhaltens sowie die Validierung der darin getroffenen Annahmen. Genau hierfür eignet sich das entwickelte Testwerkzeug. Die daraus resultierenden Modelle werden die Möglichkeit bieten, „per Knopfdruck“ die Güte des Ladungssicherungssystems zu bewerten. Bei Verbindung der Modelle mit validierten Fahrzeugmodellen besteht dann zudem die Möglichkeit, die Bewertung und somit auch die Auslegung fahrzeugspezifisch durchzuführen, sofern hierfür die rechtliche Grundlage geschaffen wird. Eine Erweiterung der Modelle mit Optimierungsalgorithmen ermöglicht des Weiteren eine optimale Auswahl und Auslegung der Sicherungsmittel an die Ladungstypen und das Transportfahrzeug.

A Anhang

A.1 Übersicht über die Vorschriften zur Ladungssicherung

Tabelle 7: Übersicht über Vorgaben zur Ladungssicherung²⁵⁵

<i>Ladungssicherungspflicht</i>				
	Privatrecht			
	Beförderungsrecht	Zivilrecht	Öffentliches Recht	Strafrecht
	§412 HGB Verladen und Entladen	§7 Abs. 1 StVG Haftung des Fahrzeughalters	§22 StVO Ladung	§222 StGB Fahrlässige Tötung
	§414 HGB Verschuldensunabhängige Haftung des Absenders	§823 BGB Schadensersatzpflicht aufgrund unerlaubter Handlungen	§23 StVO Sonstige Pflichten von Fahrzeugführern	§229 StGB Fahrlässige Körperverletzung
	§425 HGB Haftung für Güter- und Verspätungsschäden		§31 Abs. 2 StVZO Verantwortung für den Betrieb der Fahrzeuge	§315 StGB Gefährliche Eingriffe in den Straßenverkehr
	Art. 17 Abs. 4 c CMR ²⁵⁶ Haftung des Frachtführers		§3 BGV D29 Bau- und Ausrüstung - Allgemeines	§324 StGB Gewässerunreinigung
			§22 BGV D29 Fahrzeugaufbauten, Aufbauteile, Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung	§324 a StGB Bodenunreinigung

²⁵⁵ Tabelle nach Schneider J. et al: Das 1x1 der Ladungssicherung im Straßengüterverkehr, 2013, S.7 erweitert

²⁵⁶ Übereinkommen internationaler Straßengüterverkehr

Mögliche Rechtsfolgen	§37 BGV D29 Be- und Entladen			§326 StGB Unerlaubter Umgang mit gefährlichen Abfällen
	Schadenersatz	Schadenersatz, Schmerzensgeld	Bußgeld, Fahrverbot, Eintragung im Verkehrszentralregister	Geldstrafe, Freiheitsstrafe, Fahrverbot, Entziehung der Fahrerlaubnis

A.2 Virtuelle Fahrversuche: Parameter

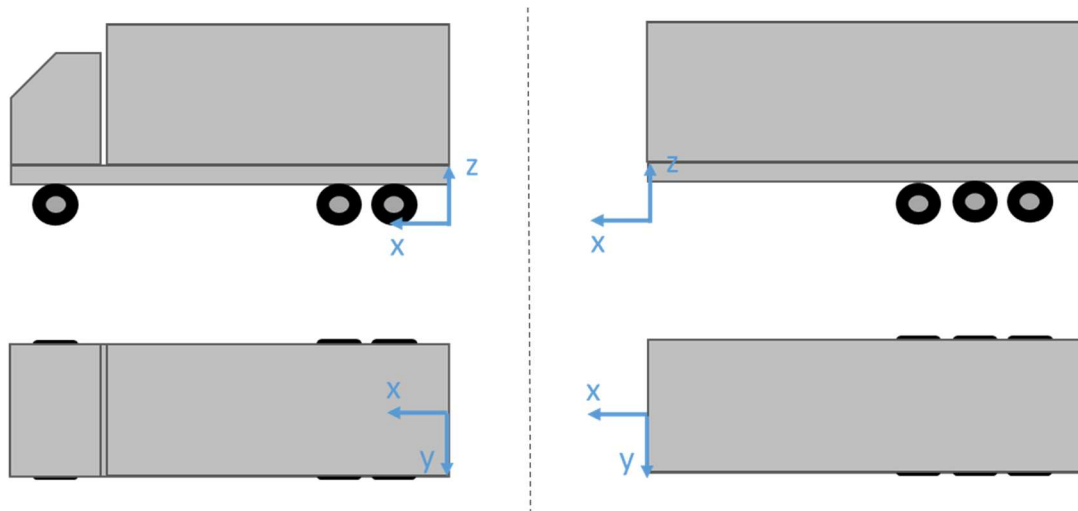


Abbildung 33: Solo-/Zugfahrzeug-Koordinatensystem (links), Anhänger-Koordinatensystem (links)

7,5 t-Lkw

Tabelle 8: Simulationsparameter 7,5 t-Lkw

Körper	Position x-Achse in m	Position y-Achse in m	Position z-Achse in m	Masse in kg	J_{xx} in kgm^2	J_{yy} in kgm^2	J_{zz} in kgm^2
Körper A	5,40	0	1,450	1710	350	480	680
Körper B	2,05	0	1,450	4400	1040	8880	12000
Verbindung A-B	4,60	0	0,625	-	-	-	-

Radträger VL	5,00	0,94	0,362	52	31	2	31
Radträger VR	5,00	-0,94	0,362	52	31	2	31
Radträger HL	1,30	0,84	0,368	62	35	2,8	35
Radträger HR	1,30	-0,84	0,368	62	35	2,8	35
Rad VL	5,00	0,94	0,362	25	5	5,3	5,0
Rad VR	5,00	-0,94	0,362	25	5	5,3	5,0
Rad HL	1,30	0,84	0,368	25	10	9,5	10
Rad HR	1,30	-0,84	0,368	25	10	9,5	10
Anhängerkupp- lung	0,30	0	0,5	-	-	-	-

7,5 t-Lkw-Anhänger (Gliederzug)

Tabelle 9: Simulationsparameter 7,5 t-Lkw-Anhänger (Gliederzug)

Körper	Posi- tion x- Achse in m	Posi- tion y- Achse in m	Posi- tion z- Achse in m	Masse in kg	J_{xx} in kgm ²	J_{yy} in kgm ²	J_{zz} in kgm ²
Körper A	-5,00	0	1,75	9800	10000	4250	6500
Radträger VL	-4,50	1,00	0,422	60	24,5	2	24,5
Radträger VR	-4,50	-1,00	0,422	60	24,5	2	24,5
Radträger HL	-5,50	1,00	0,422	60	24,5	2	24,5
Radträger HR	-5,50	-1,00	0,422	60	24,5	2	24,5
Rad VL	-4,50	1,00	0,422	176	14	26,5	14
Rad VR	-4,50	-1,00	0,422	176	14	26,5	14
Rad HL	-5,50	1,00	0,422	176	14	26,5	14
Rad HR	-5,50	-1,00	0,422	176	14	26,5	14

26 t-Lkw (Atego)

Tabelle 10: Simulationsparameter 26 t-Lkw (Atego)

Körper	Position x-Achse in m	Position y-Achse in m	Position z-Achse in m	Masse in kg	J_{xx} in kgm^2	J_{yy} in kgm^2	J_{zz} in kgm^2
Körper A	5,00	0	1,50	23500	20000	70000	70000
Radträger VL	8,15	1,02	0,49	150	4	4	4
Radträger VR	8,15	-1,02	0,49	150	4	4	4
Radträger HL	3,35	0,83	0,49	150	10	10	10
Radträger HR	3,35	-0,83	0,49	150	10	10	10
Radträger HL2	2,00	0,90	0,49	150	10	10	10
Radträger HR2	2,00	-0,90	0,49	150	10	10	10
Rad VL	8,15	1,02	0,49	100	10	10	10
Rad VR	8,15	-1,02	0,49	100	10	10	10
Rad HL	3,35	0,83	0,49	100	10	10	10
Rad HR	3,35	-0,83	0,49	100	10	10	10
Rad HL2	2,00	0,90	0,49	100	10	10	10
Rad HR2	2,00	-0,90	0,49	100	10	10	10

Sattel-Kfz-Zugmaschine (Actros)

Tabelle 11: Simulationsparameter Sattel-Kfz-Zugmaschine (Actros)

Körper	Position x-Achse in m	Position y-Achse in m	Position z-Achse in m	Masse in kg	J_{xx} in kgm^2	J_{yy} in kgm^2	J_{zz} in kgm^2
Körper A	3,50	0	1,00	5800	4000	4000	8000
Radträger VL	4,48	1,05	0,49	150	4	4	4
Radträger VR	4,48	-1,05	0,49	150	4	4	4
Radträger HL	0,88	0,86	0,49	150	10	10	10
Radträger HR	0,88	-0,86	0,49	150	10	10	10

Rad VL	4,48	1,05	0,49	100	10	10	10
Rad VR	4,48	-1,05	0,49	100	10	10	10
Rad HL	0,88	0,86	0,49	100	10	10	10
Rad HR	0,88	-0,86	0,49	100	10	10	10
Anhängerkupp- lung	1,48	0	1,15	-	-	-	-

Sattel-Kfz-Anhänger

Tabelle 12: Simulationsparameter Sattel-Kfz-Anhänger

Körper	Posi- tion x- Achse in m	Posi- tion y- Achse in m	Posi- tion z- Achse in m	Masse in kg	J_{xx} in kgm ²	J_{yy} in kgm ²	J_{zz} in kgm ²
Körper A	-6,10	0	2,00	10910	27100	94710	91300
Radträger VL	-7,75	1,05	0,49	75	15	2	15
Radträger VR	-7,75	-1,05	0,49	75	15	2	15
Radträger ML	-9,00	1,05	0,49	75	15	2	15
Radträger MR	-9,00	-1,05	0,49	75	15	2	15
Radträger HL	-10,25	1,05	0,49	75	15	2	15
Radträger HR	-10,25	-1,05	0,49	75	15	2	15
Rad VL	-7,75	1,05	0,49	100	15	17	15
Rad VR	-7,75	-1,05	0,49	100	15	17	15
Rad ML	-9,00	1,05	0,49	100	15	17	15
Rad MR	-9,00	-1,05	0,49	100	15	17	15
Rad HL	-10,25	1,05	0,49	100	15	17	15
Rad HR	-10,25	-1,05	0,49	100	15	17	15

A.3 Virtuelle Fahrversuche: Ergebnisse

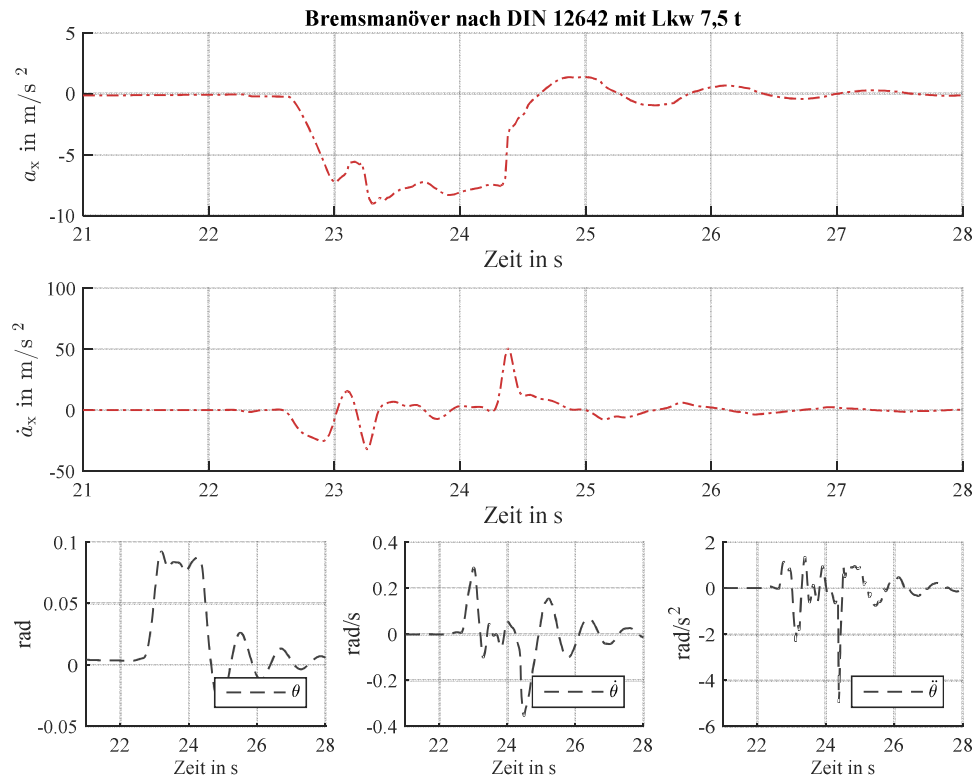


Abbildung 34: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für ein Bremsmanöver nach DIN 12642 mit einem 7,5 t-Lkw

Tabelle 13: Simulationsergebnisse für ein Bremsmanöver nach DIN 12642 mit einem 7,5 t-Lkw

$ a_{x,\max} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{x,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \text{ in s}$	$ \dot{a}_{x,\max} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{x,\text{mean}} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
9,02	0,78	50,71	14,71
$ \theta_{\max} \text{ in rad}$	$ \dot{\theta}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,09	0,35	4,97	1,41

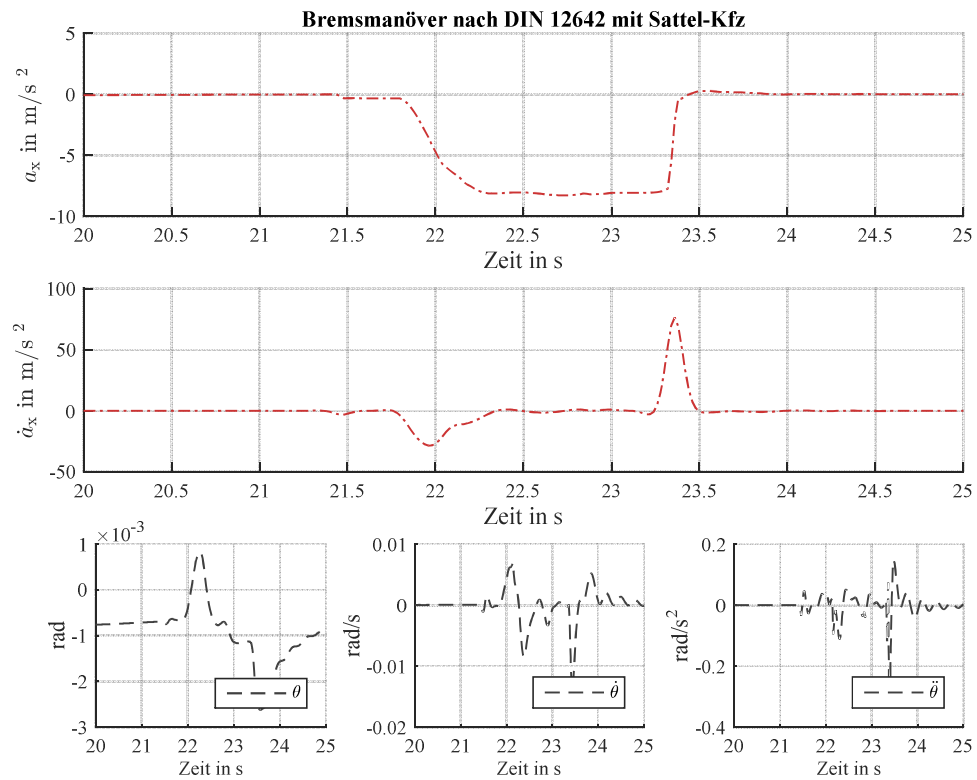


Abbildung 35: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für ein Bremsmanöver nach DIN 12642 mit einem Sattel-Kfz

Tabelle 14: Simulationsergebnisse für ein Bremsmanöver nach DIN 12642 mit einem Sattel-Kfz

$ a_{x,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{x,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{x,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{x,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
8,27	1,18	28.49	18,79
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,01	0,01	0,11	0,07

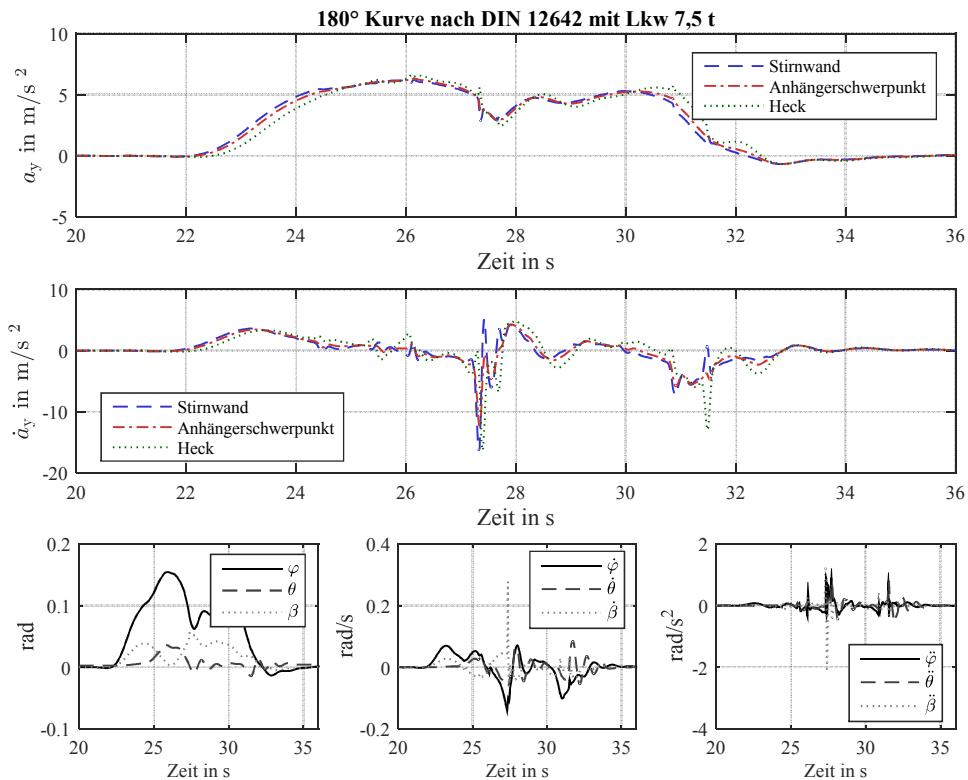


Abbildung 36: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für eine 180°Kurvendurchfahrt ($r = 25$ m) nach DIN 12642 mit einem 7,5 t-Lkw

Tabelle 15: Simulationsergebnisse für eine 180°Kurvendurchfahrt ($r = 25$ m) nach DIN 12642 mit einem 7,5 t-Lkw

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
6,24	1,30	3,62	2,44
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,154	0,141	0,925	0,101
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,036	0,085	0,810	0,353
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,056	0,277	2,14	0,082

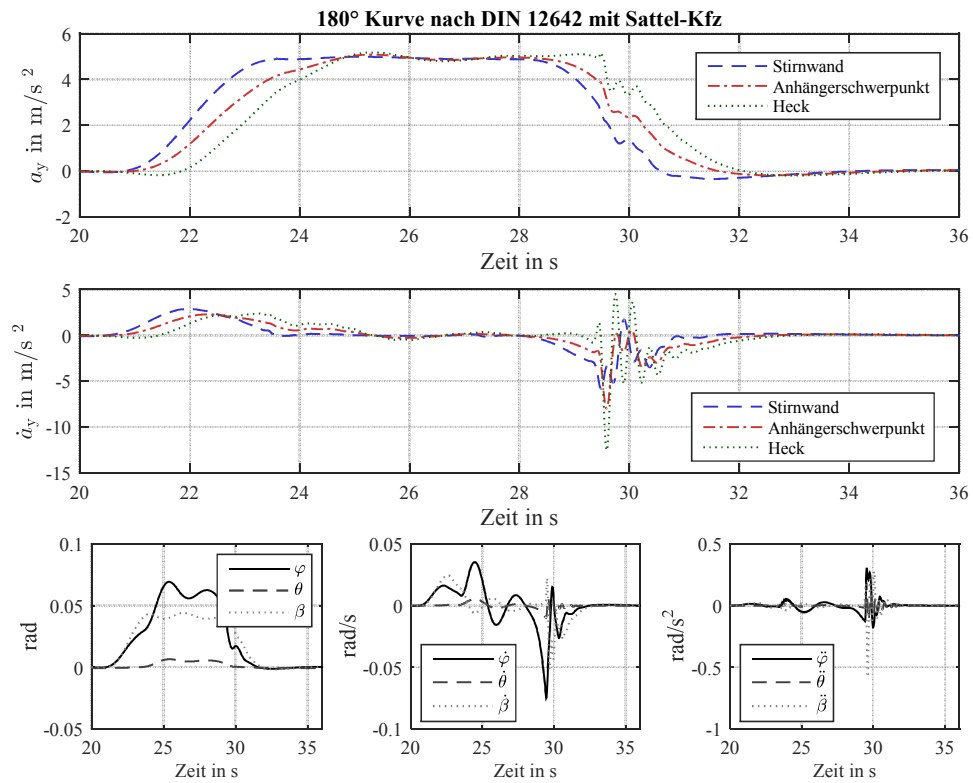


Abbildung 37: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für eine 180°Kurvendurchfahrt ($r = 25$ m) nach DIN 12642 mit einem Sattel-Kfz

Tabelle 16: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für eine 180°Kurvendurchfahrt ($r = 25$ m) nach DIN 12642 mit einem Sattel-Kfz

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
5,17	5,44	2,86	1,78
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,069	0,035	0,055	0,009
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,006	0,005	0,013	0,001
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,043	0,024	0,039	0,013

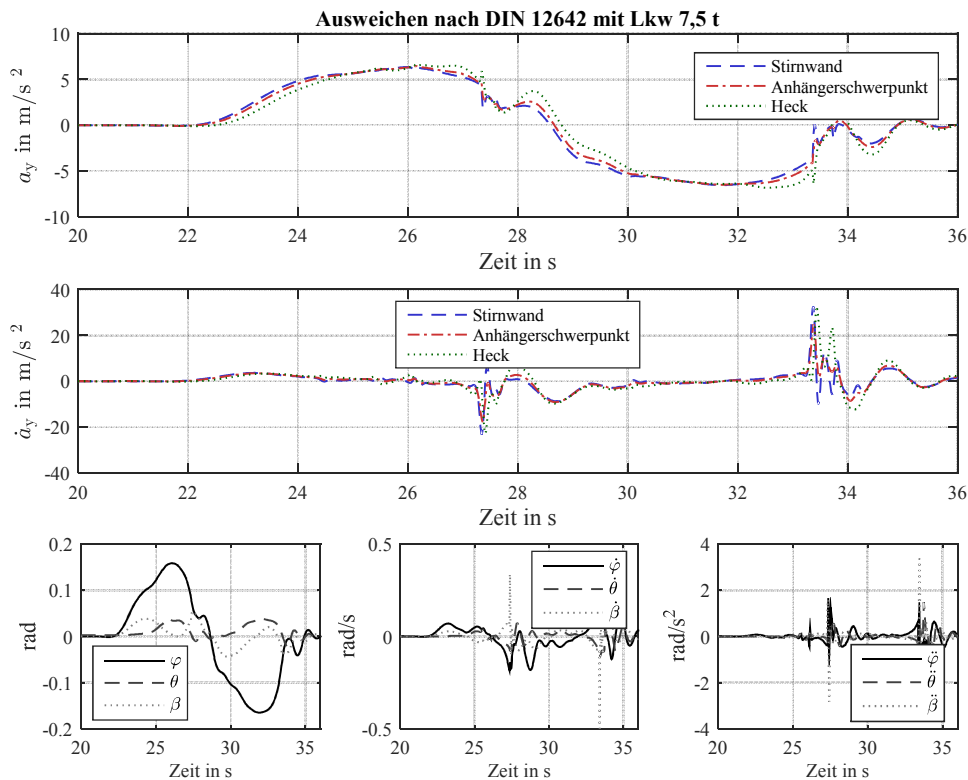


Abbildung 38: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für ein Ausweichmanöver nach DIN 12642 mit einem 7,5 t-Lkw

Tabelle 17: Simulationsergebnisse für ein Ausweichmanöver nach DIN 12642 mit einem 7,5 t-Lkw

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
6,82	2,66	32,66	2,51
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,165	0,248	1,592	0,174
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,038	0,124	1.474	0,451
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,051	0,498	3,357	0,217

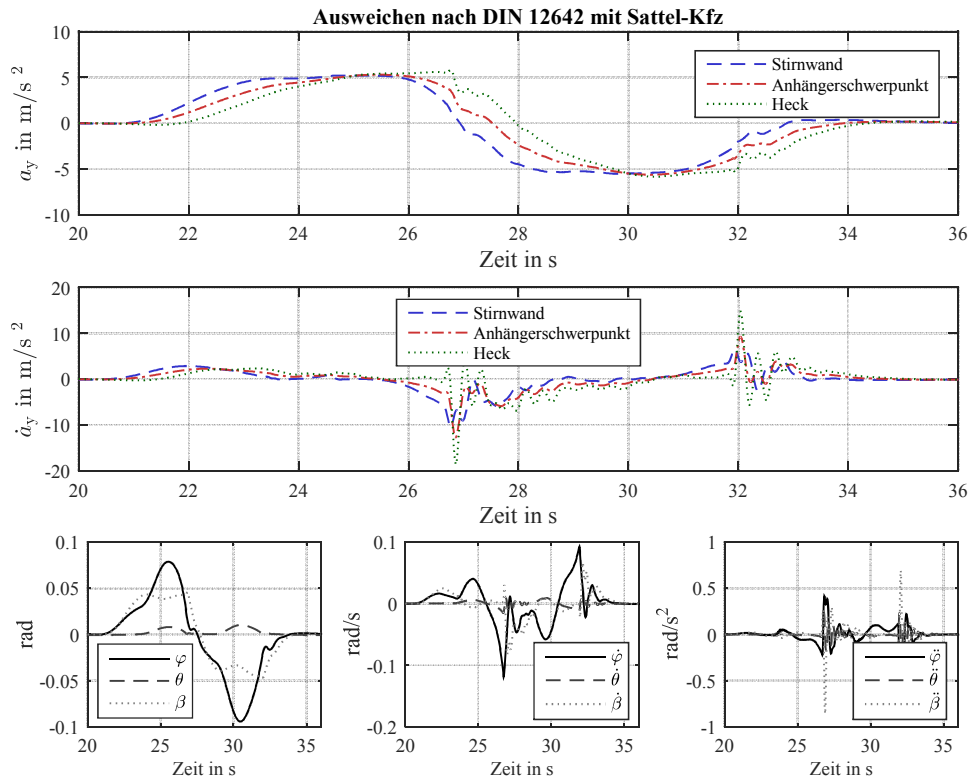


Abbildung 39: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für ein Ausweichmanöver nach DIN 12642 mit einem Sattel-Kfz

Tabelle 18: Simulationsergebnisse für ein Ausweichmanöver nach DIN 12642 mit einem Sattel-Kfz

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
5,84	2,38	18,58	1,76
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,094	0,119	0,413	0,098
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,010	0,015	0,296	0,013
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,046	0,0827	0,859	0,445

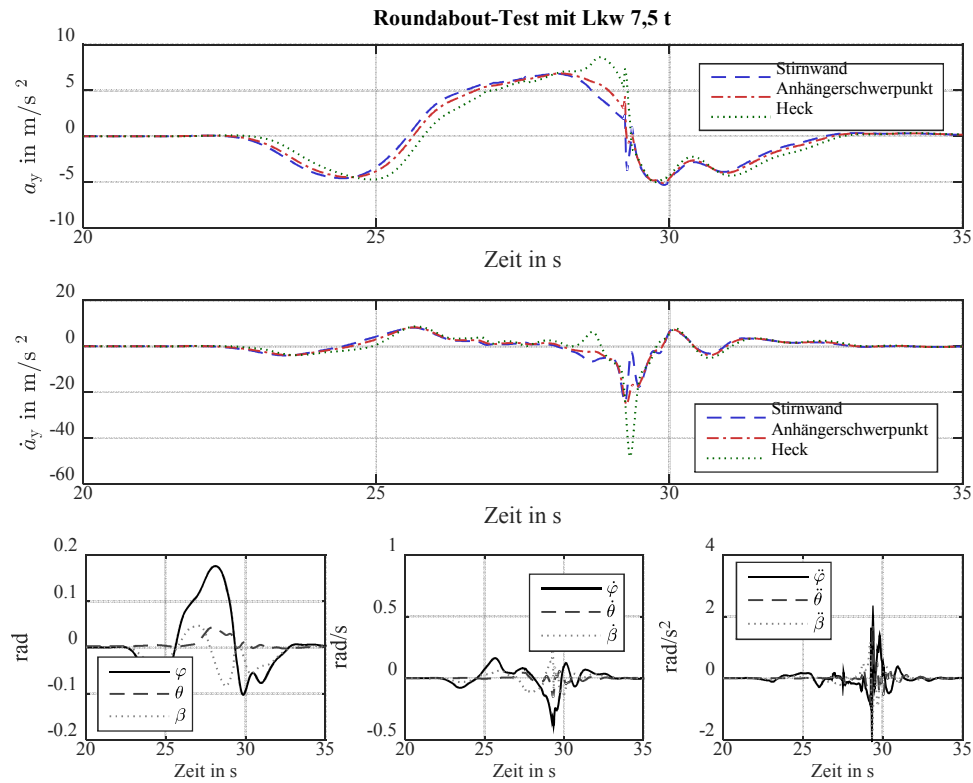


Abbildung 40: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für ein Roundabout-Test (Kreisverkehrsdurchfahrt) ($r = 24 \text{ m}$) mit einem 7,5 t-Lkw

Tabelle 19: Simulationsergebnisse für ein Roundabout-Test (Kreisverkehrsdurchfahrt) ($r = 24 \text{ m}$) mit einem 7,5 t-Lkw

$ a_{y,\max} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \text{ in s}$	$ \dot{a}_{y,\max} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
8,62	0,44	48,15	2,376
$ \varphi_{\max} \text{ in rad}$	$ \dot{\varphi}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,176	0,384	2,037	0,311
$ \theta_{\max} \text{ in rad}$	$ \dot{\theta}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,042	0,152	1,761	0,475
$ \beta_{\max} \text{ in rad}$	$ \dot{\beta}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} \text{ in } \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,084	0,716	4,976	0,559

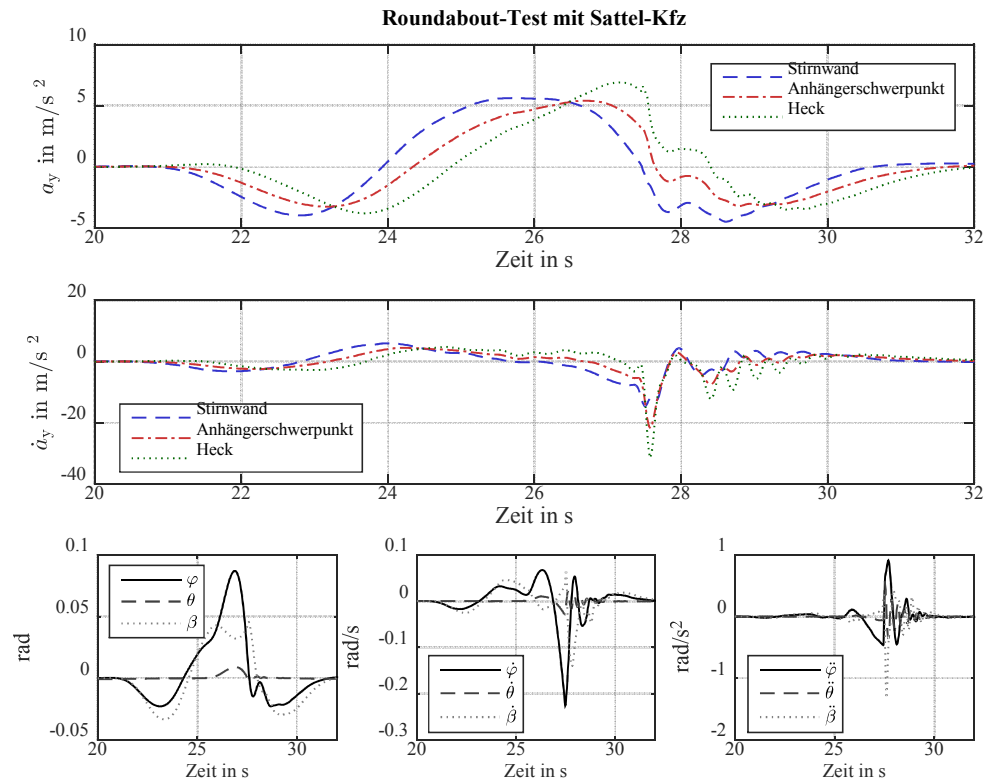


Abbildung 41: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für ein Roundabout-Test (Kreisverkehrsdurchfahrt) ($r = 24$ m) mit einem Sattel-Kfz

Tabelle 20: Simulationsergebnisse für ein Roundabout-Test (Kreisverkehrsdurchfahrt) ($r = 24$ m) mit einem Sattel-Kfz

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
6,89	0,86	31,51	3,08
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,087	0,226	0,913	0,365
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,009	0,028	0,577	0,050
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,046	0,141	0,132	0,132

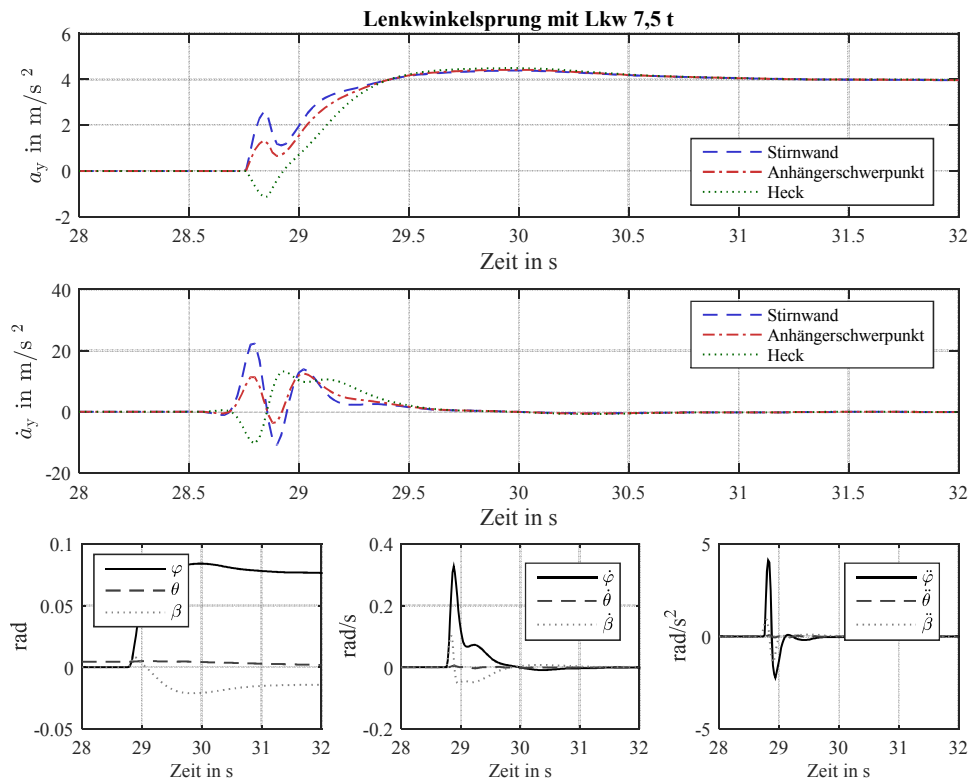


Abbildung 42: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für einen Lenkwinkelsprung mit einem 7,5 t-Lkw

Tabelle 21: Simulationsergebnisse für einen Lenkwinkelsprung mit einem 7,5 t-Lkw

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
4,49	-	22,35	8,44
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,084	0,327	4,110	2,300
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,005	0,004	0,073	0,035
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,021	0,103	1,406	0,326

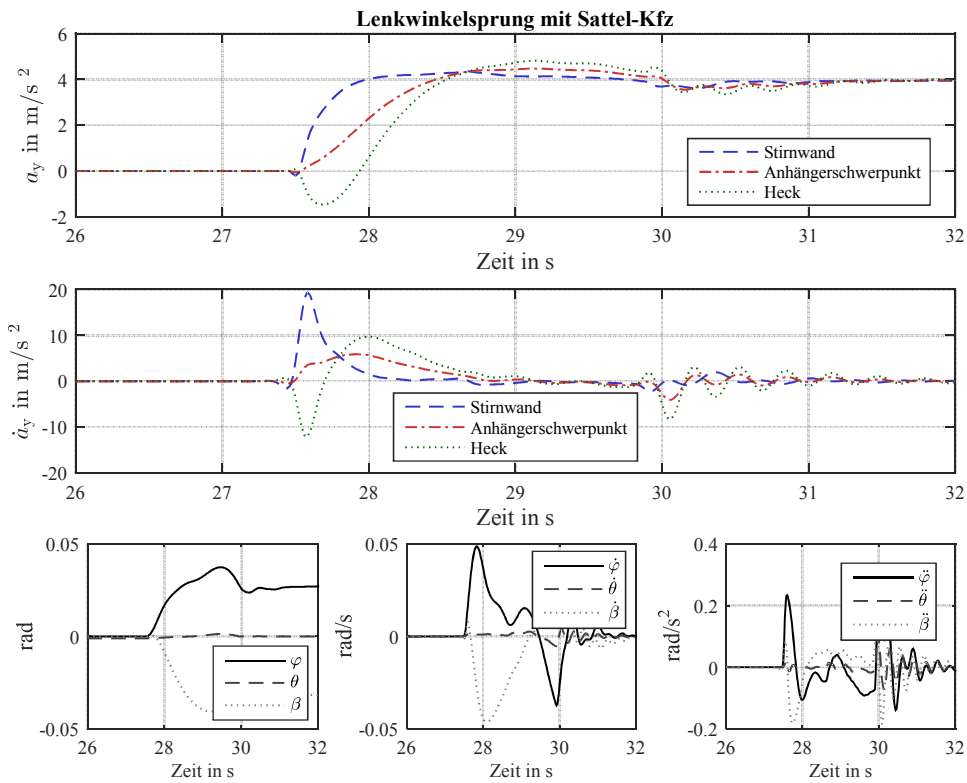


Abbildung 43: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für einen Lenkwinkelsprung mit einem Sattel-Kfz

Tabelle 22: Simulationsergebnisse (Kurvenverläufe) für einen Lenkwinkelsprung mit einem Sattel-Kfz

$ a_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$t(a_{y,\max} \pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ in s	$ \dot{a}_{y,\max} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$	$ \dot{a}_{y,\text{mean}} $ in $\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
4,81	-	19,41	7,51
$ \varphi_{\max} $ in rad	$ \dot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\varphi}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\varphi}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,037	0,049	0,234	0,135
$ \theta_{\max} $ in rad	$ \dot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\theta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\theta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,001	0,005	0,108	0,010
$ \beta_{\max} $ in rad	$ \dot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$ \ddot{\beta}_{\max} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$ \ddot{\beta}_{\text{mean}} $ in $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$
0,040	0,046	0,184	0,106

A.4 Vertikale Lastkollektive

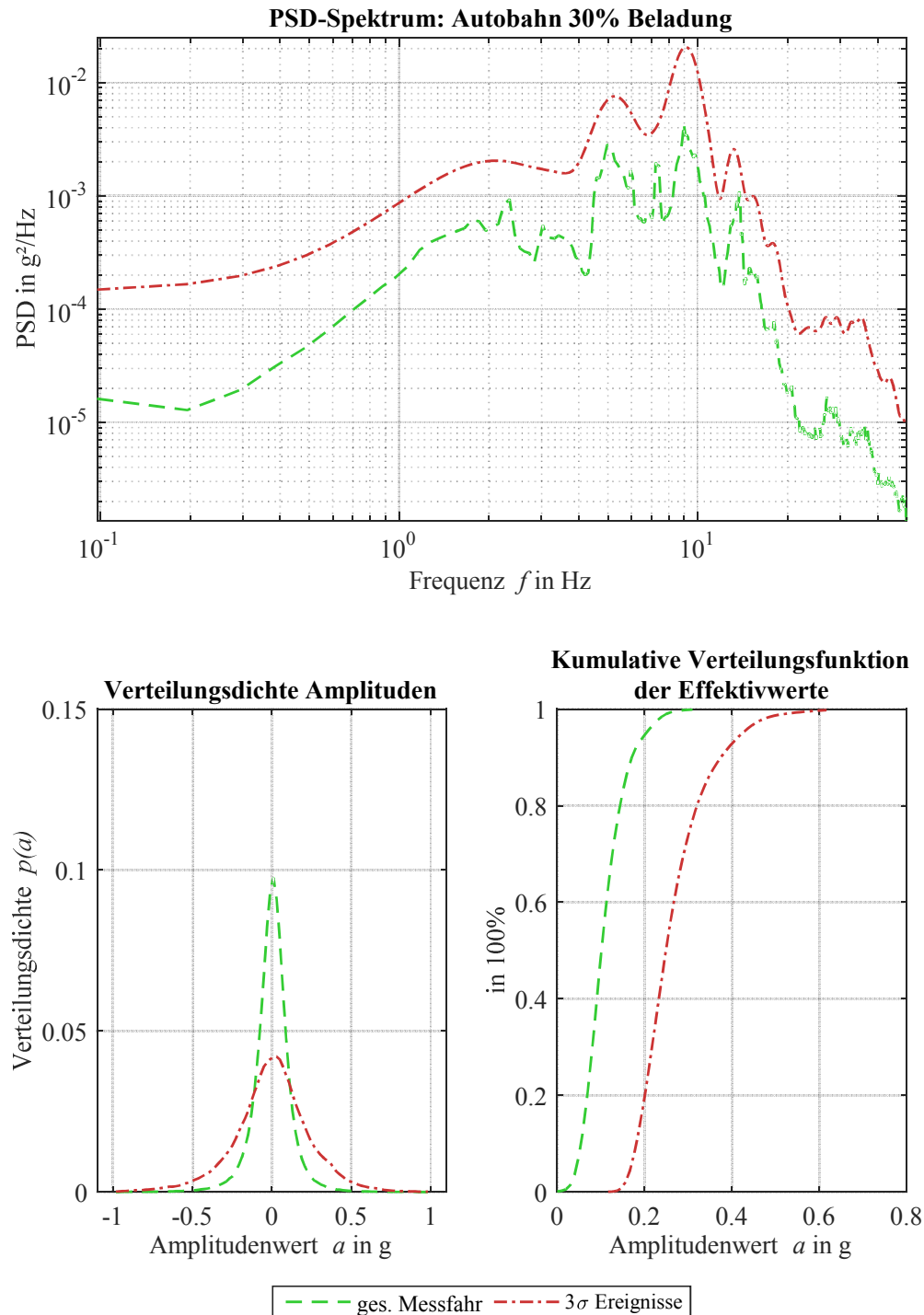


Abbildung 44: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 30% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Autobahnfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

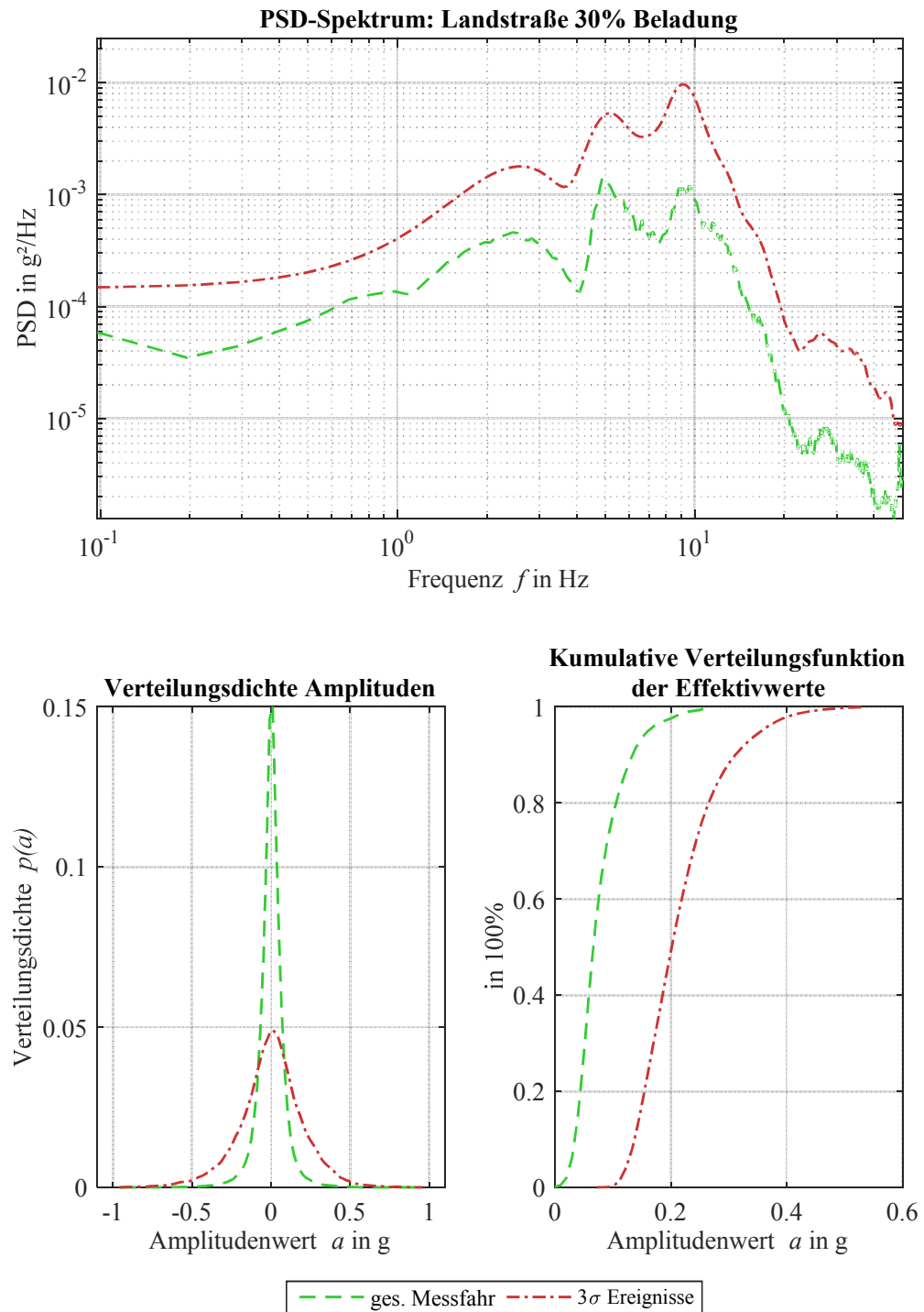


Abbildung 45: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 30% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Landstraßenfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

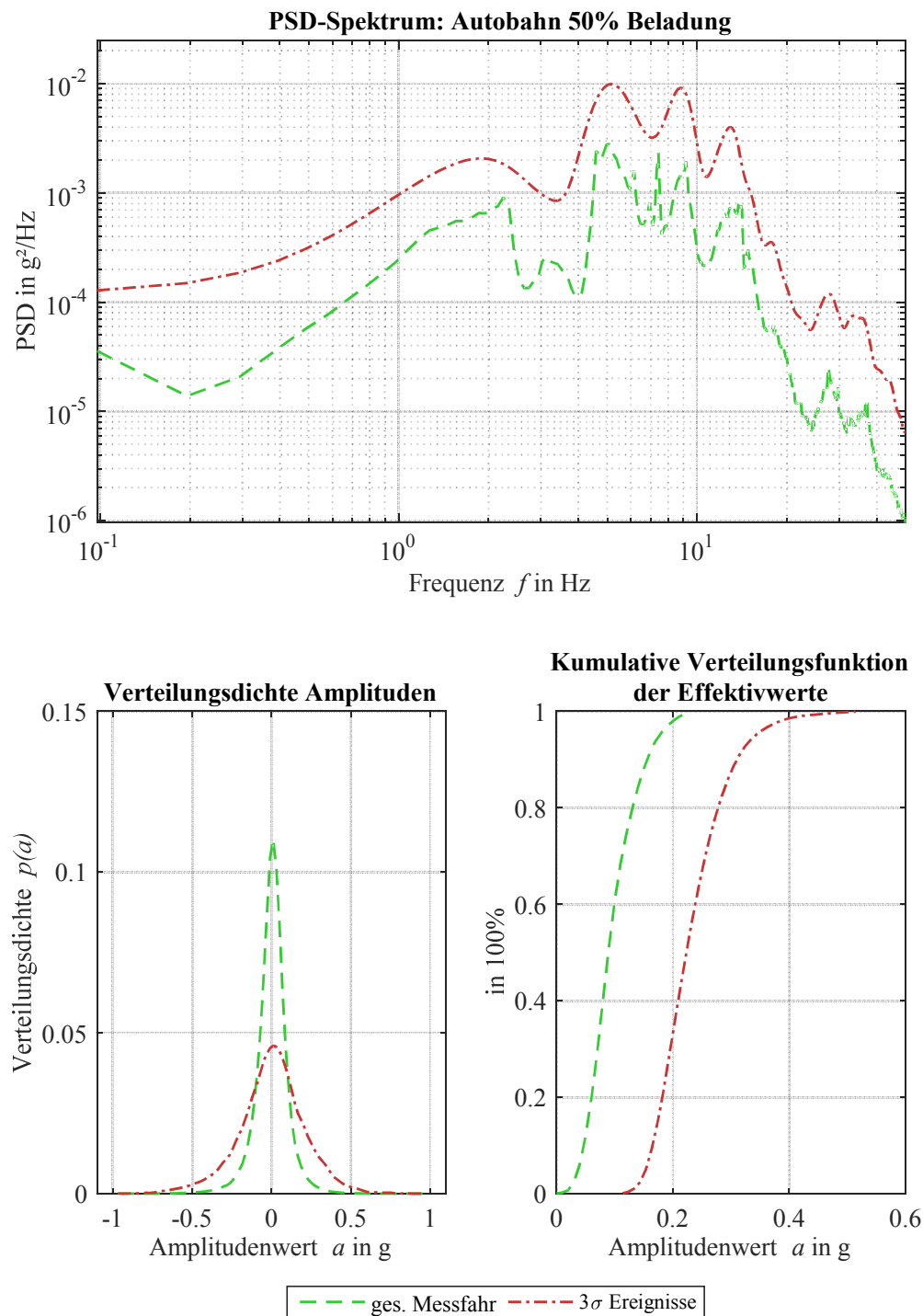


Abbildung 46: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 50% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Autobahnfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

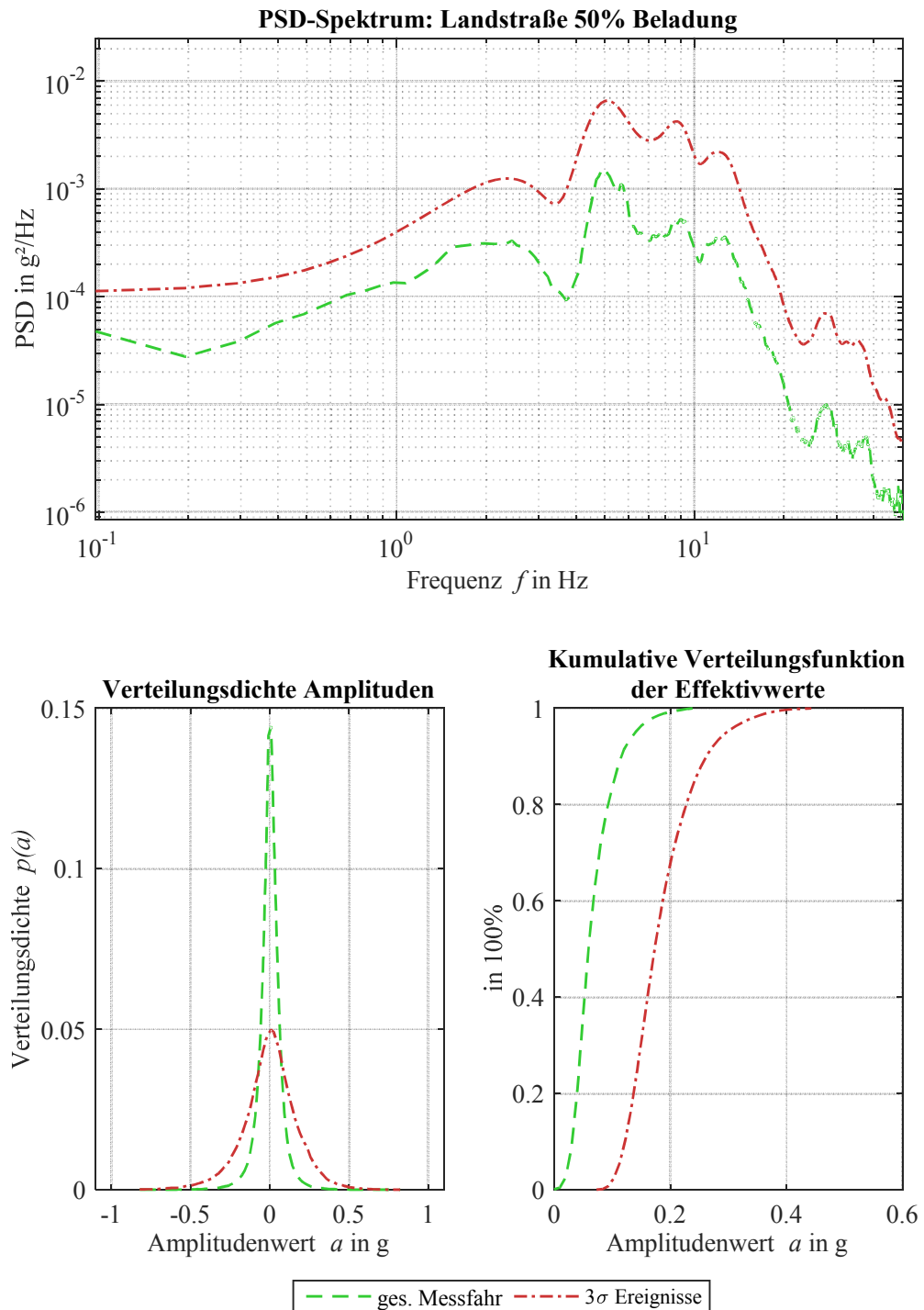


Abbildung 47: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 50% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Landstraßenfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

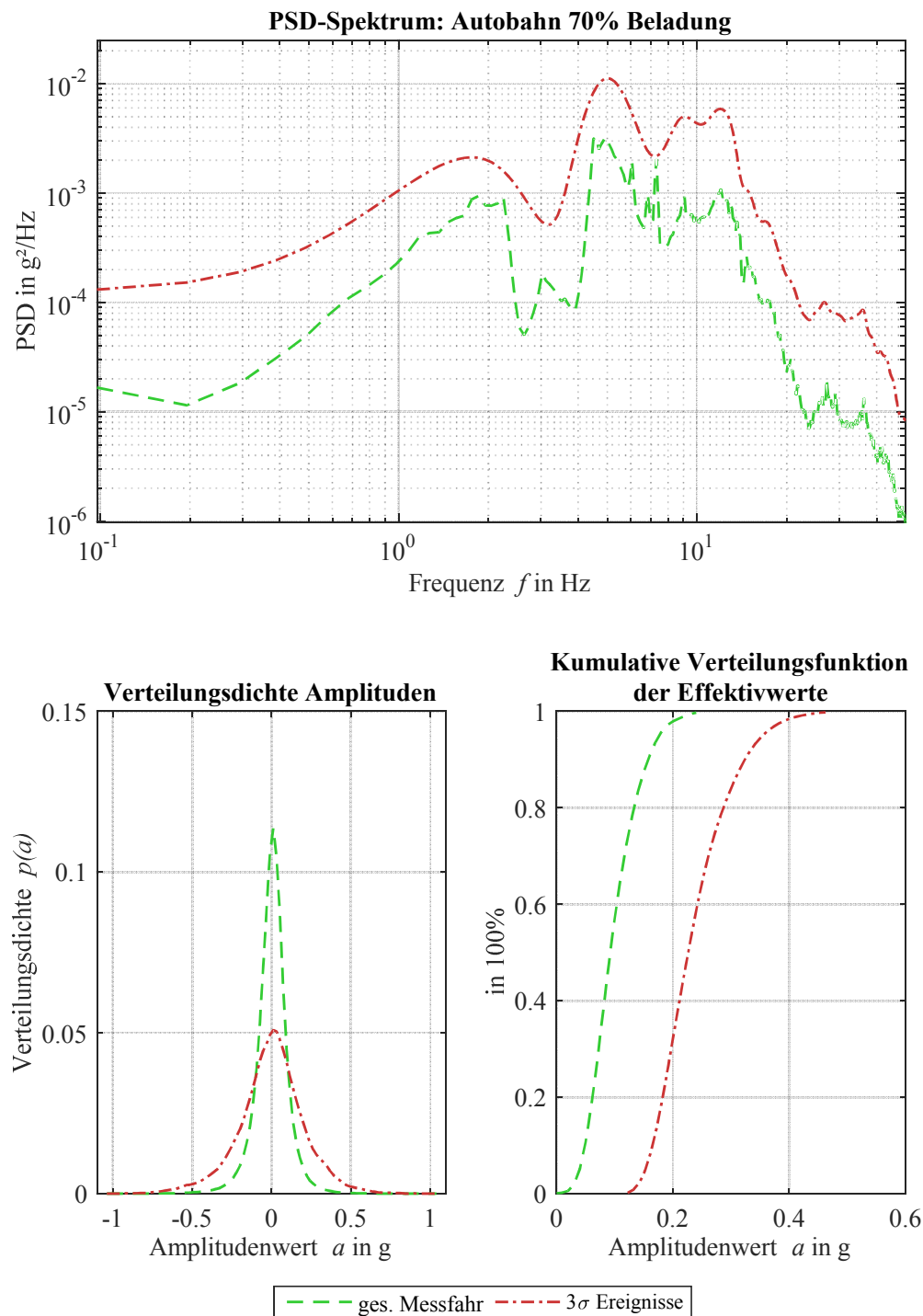


Abbildung 48: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 70% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Autobahnfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

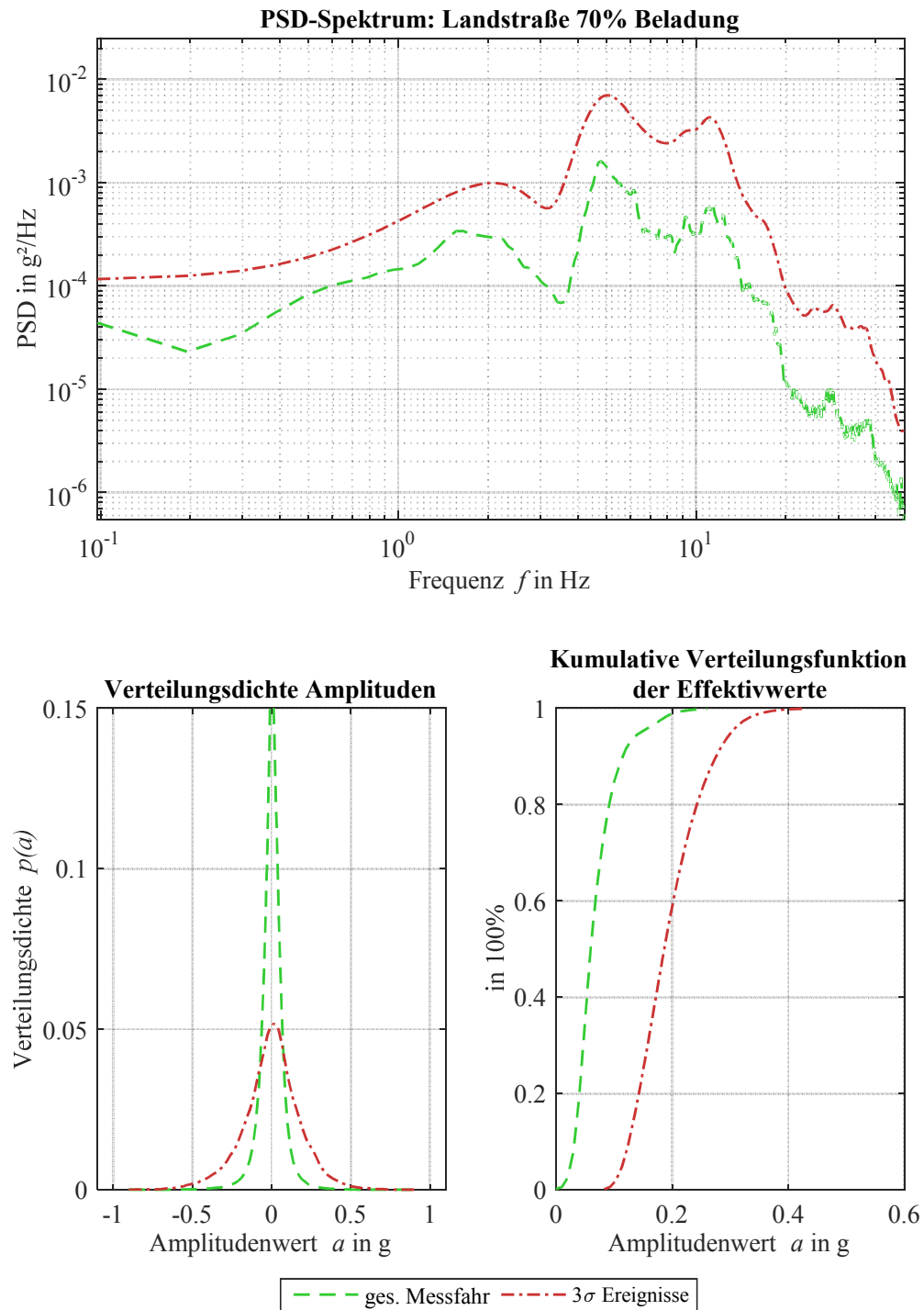


Abbildung 49: Auswertung der vertikalen Transportbelastung eines zu 70% ausgeladenen Sattel-fahrzeugs während einer Landstraßenfahrt (rund um Darmstadt): Leistungsdichtespektrum (oben); Verteilungsdichte der Amplituden (links unten); Kumulative Verteilungsfunktion der gleitenden Effektivwerte, die innerhalb eines Zeitintervalls von 1 s ermittelt wurden (rechts unten)

A.5 Unebenheitenprofil

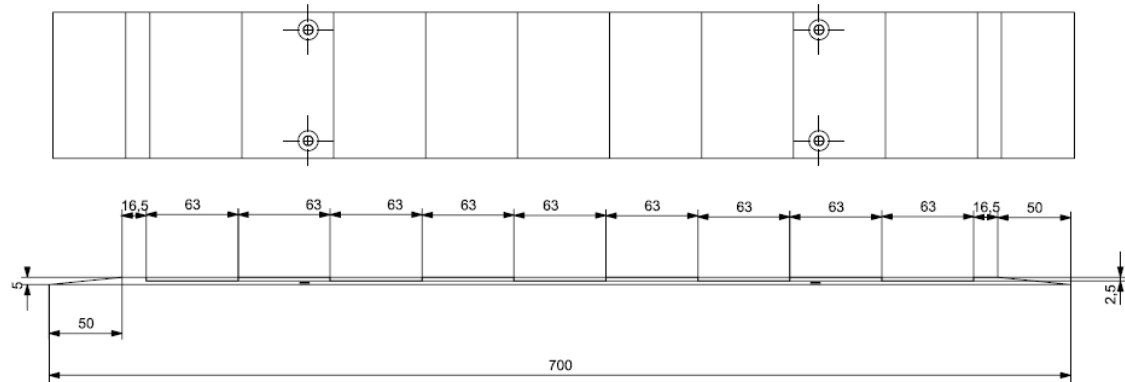


Abbildung 50: Maße des Unebenheitenprofils (alle Angaben in mm)

A.6 Versuchsergebnisse

	Beschreibung	Gesamt	OV ²⁵⁷	MV ²⁵⁸
$\bar{v}_{x,\max}$	Durchschnittliche maximale Geschwindigkeit	2,22 m/s	2,19 m/s	2,25 m/s
$\sigma_{v_{x,\max}}$	Standardabweichung der durchschnittlichen maximalen Geschwindigkeit	0,05 m/s	0,02 m/s	0,04 m/s
$\sigma_{a_{x,\max}}$	Standardabweichung der horizontalen Beschleunigung	1,16 m/s ²	0,69 m/s ²	1,72 m/s ²
$\bar{a}_{x,\max}$	Durchschnittliche maximale horizontale Beschleunigung	-7,12 m/s ²	-6,87 m/s ²	-7,39 m/s ²
$\sigma_{a_{x,\max}}$	Standardabweichung der durchschnittlichen maximalen horizontalen Beschleunigung	0,63 m/s ²	0,53 m/s ²	0,65 m/s ²
$\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}}$	Durchschnittliche über die Verzögerungsphase gemittelte horizontale Beschleunigung	-4,64 m/s ²	-4,70 m/s ²	-4,58 m/s ²

²⁵⁷ Ohne vertikaler Anregung

²⁵⁸ Mit vertikaler Anregung

$\sigma_{\bar{a}_x, \text{Verzögerung}}$	Standardabweichung der der gemittelten horizontalen Beschleunigung im Bereich der Verzögerung	0,21 m/s ²	0,04 m/s ²	0,29 m/s ²
$\bar{t}_{\text{Dauer, Verzögerung}}$	Durchschnittliche Dauer der Verzögerungsphase	471 ms	468 ms	474 ms
$\sigma_{t_{\text{Dauer, Verzögerung}}}$	Standardabweichung der durchschnittlichen Dauer der Verzögerungsphase	28 ms	28 ms	40 ms
$\bar{a}_{x, \text{Prüf}}$	Durchschnittliche über die Prüfungsphase gemittelte horizontale Beschleunigung	-5,93 m/s ²	-5,77 m/s ²	-6,10 m/s ²
$\sigma_{a_{x, \text{Prüf}}}$	Standardabweichung der horizontalen Beschleunigung im Bereich der Prüfbeschleunigung	0,66 m/s ²	0,59 m/s ²	0,74 m/s ²
$\sigma_{\bar{a}_x, \text{Prüf}}$	Standardabweichung der der gemittelten horizontalen Beschleunigung der Versuchsreihen im Bereich der Prüfbeschleunigung	0,23 m/s ²	0,10 m/s ²	0,21 m/s ²
$\bar{t}_{\text{Dauer, Prüf}}$	Durchschnittliche Dauer bei der Prüfbeschleunigung	315 ms	324 ms	300 ms
$\sigma_{t_{\text{Dauer, Prüf}}}$	Standardabweichung der durchschnittlichen Dauer bei der Die Beschleunigung $\leq -6 \text{ m/s}^2$	18 ms	18 ms	12 ms
$\bar{\bar{a}}_{x, \text{mean}}$	Durchschnitt des über die Schwellzeit der Verzögerung gemittelten Gradienten der horizontalen Beschleunigung	34,85 m/s ³	34,88 m/s ³	34,82 m/s ³
$\sigma_{\bar{\bar{a}}_{x, \text{mean}}}$	Standardabweichung des über die Schwellzeit der Verzögerung gemittelten Gradienten der horizontalen Beschleunigung	2,18 m/s ³	0,63 m/s ³	3,2 m/s ³
$\bar{\bar{a}}_{x, \text{max}}$	Durchschnittlicher maximaler Gradient der horizontalen Beschleunigung	73,21 m/s ³	64,31 m/s ³	83,10 m/s ³
$\sigma_{\bar{\bar{a}}_{x, \text{max}}}$	Standardabweichung des maximalen Gradienten der horizontalen Beschleunigung	16,17 m/s ³	5,14 m/s ³	18,70 m/s ³

	ohne vertikaler Anregung	mit vertikaler Anregung
$\bar{a}_{z,\text{eff}}$	0,16 m/s ²	1,65 m/s ²
$\sigma_{a_{z,\text{eff}}}$	0,02 m/s ²	0,31 m/s ²
$\bar{a}_{z,\text{eff}}$	0,17 m/s ²	2,57 m/s ²
(1,6 s < t < 2,3 s)		
$\sigma_{a_{z,\text{eff}}}$	0,03 m/s ²	0,55 m/s ²
(1,6 s < t < 2,3 s)		

A.7 Maximale Beschleunigung

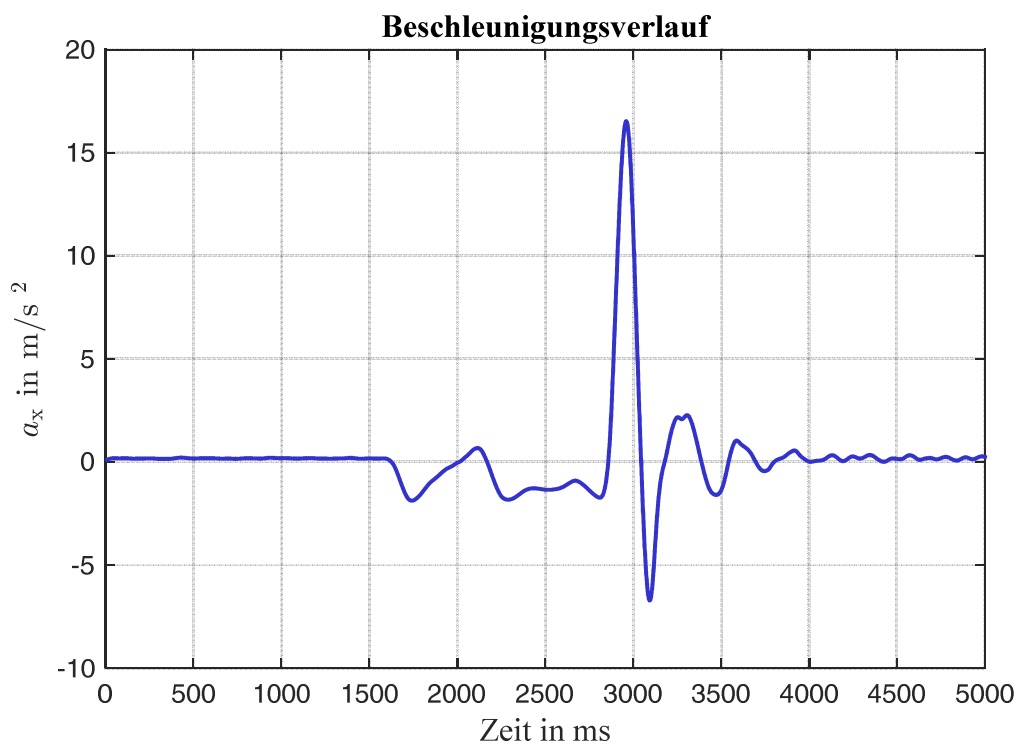


Abbildung 51: : Bei Voruntersuchungen bisher erreichte kurzzeitige maximale Beschleunigung bei einer Gesamtmasse von 2,5 t

Text

Literaturverzeichnis

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Menschen und Güter bewegen – Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand; München, 2012, Verfügbar unter: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Stellungnahmen/acatech_POSITION_Mobilitaet_und_Logistik_WEB.pdf

allsafe: Produktkatalog/-informationen; Verfügbar unter: https://www.allsafe-group.com/fileadmin/user_upload/Systemkonfiguration/Plane/AJS/AJS_Produktinformation_590471-14.pdf, Abgerufen am 17.01.2017

Andersson, P.; Sökjer-Petersen S.; Jagelčák, J.: Differences in Cargo Securing Regulations. How Could We Achieve Harmonization; 2012 Verfügbar über: <http://en.maritem.se/wp-content/uploads/2016/08/paper201209.pdf>

Assmann, D.: Modellierung einer generischen Ladungssicherungsfunktionalität zur Anbindung an Telematiksysteme (LaSiMatik); Dortmund, 2014, Verfügbar unter: http://www.gvb-ev.de/fileadmin/pdfs/Schlussbericht_LaSiMatik.pdf

Baumann F.: Untersuchung zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, Dissertation TU Darmstadt, 2003

Berg, A.; Kugele, M.; Bühren, W.: Investigation of cargo safety via real test with commercial vehicles, 3rd DEKRA Symposium “Passive Safety of Commercial Vehicles”, 17. – 18. Oktober 2002, 2002

Bernad, C.; Laspalas, A.; Nunez, L.; Buil, F.: Transport Vibration Laboratory Simulation: On the Necessity of Multiaxis Testing, Packaging Technology and Science 24, 2011,

BGI 649: Ladungssicherung auf Fahrzeugen – Ein Handbuch für Unternehmer, Einsatzplaner, Fahr- und Ladepersonal, 2002, Verfügbar unter: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi649.pdf>

BGV D29 –UVV: Unfallverhütungsvorschrift Fahrzeuge; 2007

Biermann, N.: Entwicklung eines Berechnungsansatzes zur Auslegung von Kunststofffolien zur Sicherung palettierter Ladeeinheiten; Dissertation Universität Dortmund, Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik/ Forschungsberichte und Fachbeiträge Nr. 69, Dt. Fachverl., 2007

Billing, J.: Effect of Cargo of Cargo Movement Tension in Tiedowns; CCMTA Load Security Research Project Report No. 09, 1998

Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Vieweg Verlag, 2011

Brox, T.; Bruhn, A.; Papenberg, N.; Weickert, J.: High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping; Computer Vision ECCV, Band 3024, 2004

Bruekjaer: Products, Verfügbar unter: <http://www.bruekjaer.de/Products/shakers-exciters/lds-vibration-test/shakers/highforce/V994ElectrodynamicShaker>, Abgerufen am 17.01.2017

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND): Wahnsinn Güterverkehr – Natürlich effizient; Berlin, 2006, Verfügbar unter: https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Themen/Gueterverkehr/Lkw-Maut/BUND_VCD-Flyer_Gueterverkehr_klein_1.pdf

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Masterplan Güterverkehr und Logistik; Berlin, 2008, Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/masterplan-gueterverkehr-und-logistik-2008.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Logistikstandort Deutschland; Verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Gueterverkehr-Logistik/Logistikstandort-Deutschland/logistikstandort-deutschland.html>, Abruf am 17.01.2017

Bühren, W.: Neue Richtlinie für die Lasi, gefährliche ladung 12/2016, 2016

Cristoforo, R.; Sweatman, P.: Testing and simulation of hay bale loadings on semi-trailers, Rural Industries Research and Development Corporation Publication No 03/120, 2003, Verfügbar unter: <https://rirdc.infoservices.com.au/downloads/03-120>

Dahlberg, E.: Commercial Vehicle Stability Focusing on Rollover; Dissertation Royal Institute of Technology Stockholm, Stockholm, 2001

D'Alessandro, V.: Modeling of Tank Vehicle Dynamics by Fluid Sloshing Coupled Simulation, Dissertation Politecnico Di Milano, Mailand, 2011

Department of Transport: Code of Practice – Safety of Loads on Vehicles, London, 2002, Verfügbar unter: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/411093/safetyloadsonvehicles.pdf

DEKRA: Prüfeinrichtung EKG 3.5, Verfügbar unter: http://www.dekra.de/de/pruefschlitzen-ekg-35;jsessionid=7F79492EB43D101875165D1885770BB7?p_p_id=56_INSTANCE_tB3f&p_p_lifecycle=1&p_p_state=maximized&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=3, Abruf am 17.01.2017

Die Deutschen Versicherer (GDV): Da darf nichts verrutschen; 2012, Verfügbar unter: <http://www.gdv.de/2012/07/da-darf-nichts-verrutschen/>

DIN EN 12195-1:2010: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Sicherheit – Teil 1: Berechnung von Sicherungskräften; 2011

DIN EN 12195-2:2000: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Sicherheit – Teil 1: Zurrgurte aus Chemiefasern; 2001

DIN EN 12642-1:2006: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Aufbauten an Nutzfahrzeugen – Mindestanforderungen; 2007

DIN EN 15433-3:2007: Transportbelastungen Messen und Auswertung von mechanisch-dynamischen Belastungen Teil 3: Datengültigkeitsprüfung und Datenaufbereitung für die Auswertung, 2008

DIN EN 15552:2008: Verpackung Versandfertige Packstücke Prüfpläne für die gewöhnliche Transportkette, 2008

DIN EN 30786-1:2002: Transportbelastungen Datensammlung von mechanisch-dynamischen Belastungen, 2002

DIN EN 60068-3-8:2003: Umweltprüfungen Teil 3-8: Unterstützende Dokumente und Leitfaden Auswahl zwischen verschiedenen Schwingprüfverfahren, 2004

DIN EN ISO 13355:2003: Verpackung Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten Schwingprüfung mit vertikaler Anregung, 2003

DIN EN ISO 2247:2002: Verpackung Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten Schwingprüfung mit niedriger Frequenz, 2002

DIN EN ISO 4180:2010: Verpackung Versandfertige Packstücke Allgemeine Regeln für die Erstellung von Prüfplänen, 2010

ECE-R 111: Uniform Provisions Concerning the Approval of Tank Vehicles of Categories N and O with Regard to Rollover Stability, 2001, Verfügbar unter: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r111e.pdf>

Ervin, R.; Nisonger R.; MacAdam, C.; Fancher P.: The Influence of Size and Weight Variables on the Roll Stability of Heavy Duty Trucks, Final Report UMTRI-83-10/1, 1983

EUMOS 40509: Test method for load unit rigidity; 2012

European Commission: European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport; 2002, Verfügbar unter: https://www.wko.at/Content.Node/branchen/oe/TransportVerkehr/Ladungssicherung_EU-Empfehlung_en.pdf

Fenn, B.; Hanley, J.; Simmons, I.; Smith, T.: The security of cross loaded round timber, 2003, Verfügbar unter: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr077.pdf>

Fleissner, F.; D'Alessandro, V.; Schielen, W.; Eberhard, P.: Sloshing cargo in silo vehicles, Journal of Mechanical Science and Technology 23, 2009

Flog: Untersuchung von Reibungskräften bei der Sicherung verladener Güter im Fahrbetrieb; Dortmund, 2007, Verfügbar unter: https://www.bg-verkehr.de/redaktion/medien-und-downloads/informationen/branchen/gueterkraftverkehr/untersuchung_sicherung_verladener_gueter.pdf

Frey, C.; Willms, J.: Einsatz von Retardern in der Betriebsbremsanlage von dreigliedrigen Lastzügen, FAT Schriftenreihe Nr. 105, 1993

Gasser, T.; Seeck, A.; Smith, B.: Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung; in Winner, H. Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2015

Gillespie, T.: Engineering Analysis of Cargo Restraint on commercial highway trucks: Final Report; UMTRI-87-28, Michigan, 1987

Großmann G.; Kaßmann M.: Transportsichere Verpackung und Ladungssicherung: Ratgeber für Verpacker, Verlader und Transporteure; Expert Verlag, 2005

Haken, K.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, Hanser Verlag, München 2008

Hecker, F.: Stabilisierungsassistentenfunktionen im Nutzfahrzeug; in Winner, H. Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2015

HGB: Handelsgesetzbuch vom 10.05.1897; aktuelle Fassung vom 05. Juli 2016, Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/hgb/gesamt.pdf>

Ibrahim, I.; Crolla, D.; Barton, D.: The Impact of the Dynamic Tractor-Semitraile Interaction on the Ride Behaviour of Fully-Laden and Unladen Trucks, SAE Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, 26. – 28. Oktober 2004, Chicago USA, 2004

IMO\ILO\UNECE: CTU Code Guidelines for Packing of Cargo Transport Units; 1997, Verfügbar unter: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp24/IMO_ILO_UNECE_Guidelines_packing_cargo_1997_01.pdf

IMO\ILO\UNECE: CTU Code Verfahrensregeln der IMO/ILO/UNECE für das Packen von Güterbeförderungseinheiten, Verkehrsblatt Verlag, 2015

IMV: Products; Verfügbar unter: www.imv.co.jp/e/products/vibrationtest, Abgerufen am 17.01.2017

Isermann H.: Die Kippgrenze von Sattelkraftfahrzeugen mit fester und flüssiger Ladung, Strassenverkehrstechnik Heft 200, 1970

Jafari, A.; Azadi, S.; Samadian, M.: Roll Dynamic Response of an Articulated Vehicle carrying liquids, International Journal of Automotive Engineering Vol. 3 Number 3, 2013

Juwet, M.; Bruggeman K.; De Bal, F.: Acceleration Test Machine, 2011, Verfügbar unter: http://www.fim.usv.ro/conf_1/tehnomusjournal/pagini/journal2011/files/22.pdf

Juwet, M.; Bruggeman K.: Testmethode zur Untersuchung der Stabilität von Ladeeinheiten, VKU 05 2015, 2015

Kaltenborn, S.: Festigkeitsuntersuchungen an flexiblen Schüttgutbehältern bei auftretenden Stoßbelastungen, Dissertation TU Clausthal, 2006

Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr - Fakten, Bremen, 2013, Verfügbar unter: http://www.tis-gdv.de/tis/lis/lis_im_strassenverkehr_die_fakten/aufsatz_ladungssicherung_fakten.pdf

Kaps, H.: Ladungssicherung im Straßenverkehr - Wer kennt die Wahrheit; Bremens 2011, Verfügbar unter: http://www.tis-gdv.de/tis/lis/lis_im_strassenverkehr/Ladungssicherung_im_Strassenverkehr_110517.pdf

Keferstein, C.; Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik – Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren; Springer Vieweg, 2015

Kollmann, T.: Schwingungsinduziertes Fließen feinstkörniger, kohäsiver Pulver, Dissertation Universität Magdeburg, Magdeburg, 2002,

Kong, W.: A Method of selecting and Configuring Optimal Energy Absorbing Cargo Restraint Systems to Improve Crashworthiness; 2010, Verfügbar unter: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/6617

Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, ATZ/MTZ-Fachbuch, Wiesbaden 2009

Lackmann, J.: Mechanik; in Grote, K.; Feldhusen, J.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 21. Auflage, Springer, 2005

Liberté, M.: Modélisation et simulation d'un véhicule servant à l'étude de l'arrimage direct dans le transport d'équipements hors norms; 2004, Verfügbar über: <http://www.theses.ulaval.ca/2004/22068/22068.pdf>

Markert, R.: Skript zur Vorlesung Schwingungsmesstechnik, 2005

Mercer, W.; Billing, J.: Effect of Cargo and Tiedown Characteristics on Equalization of Tension in the Spans of Tiedowns; CCMTA Load Security Research Project Report No. 05, 1997

Mercer, W.; Billing, J.: Load Capacity of nailed wood blocking; CCMTA Load Security Research Project Report No. 08, 1997

Mercer, W.; Billing, J.: Tests on methods of securement fort thick metal plate, CCMTA Load Security Research Project Report No. 11, 1997

Metz, L.; Dover, M.; Fisher, J.; McCleary, V.: Comparison of Linear Roll Dynamics Properties for a Various Vehicle Configuration, SAE Technical Paper, 1992

Meywerk, M.; Aykent B.; Tomaske W.: Einfluss der Fahrdynamikregelung auf die Sicherheit von N1-Fahrzeugen bei unterschiedlichen Beladungszuständen, Abschlussbericht Teil 2, 2009

Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer, Wiesbaden, 2003

Naefe, P.: Einführung in das Methodische Konstruieren, Springer Verlag, Wiesbaden, 2009

Neale, M.; Caroll, J.; Claydon, M.: A Technical Reference on Cargo Restraint for Light Commercial Vehicles under Accident Conditions, Unpublished Project Report CPR057 2008, Verfügbar unter: http://www.fta.co.uk/export/sites/fta/_galleries/downloads/loading_of_vehicles/technical_reference_on_cargo_restraint.pdf

Nordström, R.; Andersson, P.; Sökjer-Ptersen, S.: Verification level of basic parameters important for dimensioning of cargo securing arrangements; Stockholm, 2004, Verfügbar unter: <http://www.mariterm.se/wp-content/uploads/2016/08/VERIFY-Report-041022.pdf>

NSC Standard 10: Cargo Securement, The NSC Standard 10 Cargo Securement was approved by the Council of Ministers Responsible for Transportation and Highway Safety on June 8, 2013, USA 2013

NTC National Transport Commission Australia: Load Restraint Guide Guidelines and Performance Standards of Loads on Road Vehicles, 2004, Verfügbar unter: [https://www.ntc.gov.au/Media/Reports/\(E62BE286-4870-ED95-1914-1A70F3250782\).pdf](https://www.ntc.gov.au/Media/Reports/(E62BE286-4870-ED95-1914-1A70F3250782).pdf)

Podzuweit U.: Schüttgut in BigBags, 2012, Verfügbar unter: http://www.klsk.de/fileadmin/KLSK/user_upload/pdf/Fachausschuesse/BigBag/Schuettgut_in_Bigbags.pdf

Podzuweit, U.: Sicherung von Kurzholz auf Straßenfahrzeugen, 2005, Verfügbar unter: http://www.tis-gdv.de/tis/ls/holzversuche/gdv_kurzholz_abschlussbericht.pdf

Podzuweit, U.; Lemmer, H.: Schüttgut Ladungssicherung- Schäden – Ursachen – Vermeidung; Verkehrsverlag Fischer, Düsseldorf, 2012

Predictive Engineering: LS-DYNA Cargo Net Simulation, Verfügbar unter: http://www.predictiveengineering.com/system/files_force/ls-dyna_cargo_net_simulation_nonlinear_fea_consulting_0.pdf?download=1

Priddy, J.; Jones, R.: Experimental Determination of the Effect of Cargo Variations on Roll Stability, 2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Conference, 01. – 03. November 2005, Chicago USA, 2005

Rakheja, S.; Piché, A.: Development of Directional Stability Criteria for an Early Warning Safety Device, SAE Paper 1990

Rakheja, S.; Sauv , P.; Juras, D.: Experimental Evaluation of Friction coefficients of Typical Loads and Trailer Decks under Vertical Vibration, CCMTA Load Security Research Project Report No. 02, 1997

Richtlinie 2014/47/EU: Richtlinie des europäischen Parlamentes und des Rates vom 03. April 2014 über die technische Unterwegskontrolle der Verkehrs- und Betriebssicherheit von Nutzfahrzeugen, die in der Union am Straßenverkehr teilnehmen, und zur Aufhebung der Richtlinie 2000/30/EG, 2014

Richtlinie 96/53/EG: Richtlinie des Rates vom 25. Juli 1996 zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr, 1996

Romero, J.; Lazano, A; Ortiz, W.: Modelling of liquid cargo – vehicle interaction during turning manoeuvres, 12th IFToMM World Congress, 18. – 21. Juni 2007, Besancon Frankreich, 2007

Romero, J.; Lazano, A; Rakheja, S.; Ahmed, A.; Hong, H.: Restraint cargo dynamics in road transportation: direct tiedowns; Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design Vol. 9 No. 2, 2004

Romero, J.; Rakheja, S.; Ahmed, A.; Lazano, A.: Restraint cargo dynamics in road transportation: indirect tiedowns; Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design Vol. 11 No. 2, 2002

Romero, J.; Rakheja, S.; Lazano, A.: Simulation of Solid Cargo-Vehicle interaction During Braking of Heavy Vehicle with ABS; Proceedings of IMECE 2005, 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 05. – 11. November 2005, Orlando, Florida USA, 2005

Sankar, S.; RANGANATHAN, R.; Rakheja, S.: Impact of Dynamic Fluid Slosh Loads on the Directional Response of Tank Vehicles, in Vehicle System Dynamics 21, 1992

Schneider, J.; Nold, C.; Kavuncu, E.: Das 1x1 der Ladungssicherung im Straßengüterverkehr – Die Verantwortlichkeiten der am Transport Beteiligten, IHK Stuttgart, Stuttgart, 2013, S6 ff, Verfügbar unter: https://www.ostwuerttemberg.ihk.de/blob/hdhihk24/produktmarken/Standortpolitik/download/3309722/6c16c60332ff0be3fb673524ba2ab992/Das_1_x_1_der_Ladungssicherung_im_Strassengueterverkehr-data.pdf

Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter Fließeigenschaften und Handhabung, Springer, 2009

Shires, D.: Methodologies for Vibration Testing Packaged-Products; ista whitepaper, 2014, Verfügbar unter: https://www.ista.org/forms/David_Shires_WhitePaper_2014_Published.pdf

SpanSet: Produktkatalog Ladungssicherung, Verfügbar unter: http://www.spanset.de/fileadmin/spanset_de/pdf/catalogue/Katalog_LaSi_2016.pdf, Abgerufen am 17.01.2017

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2015; Wiesbaden, 2015, Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2015.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle – Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr; 2013; Wiesbaden, 2014 Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/UnfaelleGueterkraftfahrzeuge5462410137004.pdf?__blob=publicationFile

StVO: Straßenverkehrs-Ordnung vom 06. März 2013; in Kraft getreten am 01.04.2013 Verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/stvo_2013/gesamt.pdf

StVZO: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012; in Kraft getreten am 05. Mai 2012, Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/stvzo_2012/gesamt.pdf

Turki T.: Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen; Dissertation KiT (Karlsruher Institut für Technologie), Band 76 Forschungsberichte, 2014

VDI 2700 Blatt 2: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Berechnung von Sicherungskräften Grundlagen; 2014

VDI 2700 Blatt 3.2: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung; 2006

VDI 2700 Blatt 3.3 (Entwurf): Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Netze zur Ladungssicherung; 2011

VDI 2700 Blatt 4: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen Lastverteilungsplan, 2012

VDI 2700 Blatt 5: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Qualitätsmanagementsysteme, 2011;

VDI 2700 Blatt 18 – Entwurf: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Sichern von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen; 2014

VDI 3968 Blatt 1 (Entwurf): Sicherung von Ladeeinheiten; 2009

Viisoreanu, A.; Rutman A.; Cassat G.: Analysis of an Aircraft Cargo Net Barrier Using MSC/Nastran, 1999

Voegel-Fahrzeugbau: Ladungssicherung, Verfügbar unter: <http://www.vogel-fahrzeugbau.de/index.php?s=ladungssicherung>, Abruf am 17.01.2017

Vogt, H.: Zum Einfluss von Fahrzeug-und Straßenparametern auf die Ausbildung von Straßenunebenheiten; Dissertation KiT (Karlsruher Institut für Technologie), Schriftenreihe des Instituts für Technische Mechanik – Karlsruhe Institut für Mechanik, 2013

Winkler, C.: Rollover of Heavy Commercial Vehicles, UMTRI Research Review October – December 2000, 2000

Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente Normung, Berechnung, Gestaltung, Vieweg+Teubner, 2011

Wulhorst, K.; Semsch, U.; Bühren, W.: Vergleich der Berechnungsmethoden mit praktischer Untersuchung von kraftschlüssigen, formschlüssigen und kombinierten Ladungssicherungsmaßnahmen, DEKRA VDI Symposium Ladungssicherung, 23. Oktober 2013, Klettwitz, 2013

Wurster, U. Ortlechner, M.; Schick, B.; Drenth, E.; Crawley J.: Simulationsbasierte Homologation von Bremsen für Lkw-Anhänger, ATZ 09-2010, 2010

ZONG, C.; ZHANG, H.; YI, Z.: The Difference and Validation of Cargo Securing Rules of Transport in Major Countries, 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, 04.- 07. Juli 2014, Changsha, China, 2014

Eigene Veröffentlichungen

Caspar-Terizakis, C.; Bieker, S.; Cornel, P.; Heinelt, H.; Klonecki, K.; Wagner, M.; Wißbrok, K.; Winner, H.: From Historical Roots to Modern-Day Results: Technische Universität Darmstadt and Tongji University's Bi-lateral Strategic Partnership; in Banks, C.; Siebe-Herbig, B.; Norton, K.: Global Perspectives on Strategic International Partnerships: A Guide to Building Sustainable Academic Linkages, Institute of International Education, New York, USA, 2016

Habermann, K.; Winner, H.; Fecher, N.; Klonecki, K.: Prüfvorrichtung und Prüfverfahren für transportierbare Ladungseinheiten, Offenlegungsschrift DE102014112847A1, Deutsches Patent- und Markenamt, 2016

Klonecki, K.; Winner, H.: Case study of the behavior of FIBC's under static and dynamic loads, 4th International EUMOS Symposium 2015, 19.-20. November, in Wien, Österreich, 2015 (Fachvortrag und veröffentlichten Präsentationsfolien)

Klonecki, K.: Prüfung und Berechnungsansätze bei Weichverpackungen, KLSK Fachtagung, 8-9 Mai 2015, Gelsenkirchen, Deutschland, 2015 (Fachvortrag und veröffentlichten Präsentationsfolien)

Klonecki, K.; Winner, H.: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung des Verhaltens von Ladung und Ladungssicherungsmaßnahmen, SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2014, 18.-19. November 2014, in Baden-Baden, Deutschland, 2014

Klonecki, K.: A new method to investigate the behavior of cargo and cargo securing measures, 3rd International EUMOS Symposium 2014, 6.-7. November, in Brüssel, Belgien, 2014 (Fachvortrag und veröffentlichten Präsentationsfolien)

Klonecki, K.: Konzeption und Entwicklung eines stationären Prüfstandes zur Untersuchung des Verhaltens von Schüttgütern, Master-Thesis Nr. 541/12 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt, 2013

Betreute studentische Arbeiten

Arens, Niklas: Entwicklung eines Simulationsmodells eines FIBC, Bachelor-Thesis Nr. 1231/15, 2015

Bartel, Mark: Modellierung des Verhaltens von Ladung und Ladungssicherungsmaßnahmen unter Transportbeanspruchungen, Bachelor-Thesis Nr. 1192/14, 2014

Büechl, Robin: Entwicklung einer Bewertungsmethode für Parkassistenzsysteme, Bachelor-Thesis Nr. 1193/14, 2014

Eggert, Lukas: Umsetzung und Überprüfung der Validität eines Modellansatzes für das Verhalten von BigBags, Bachelor-Thesis Nr. 1205/14, 2014

Frank, Christoph: Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung von Verformungen und Bewegungen von Big Bags, Studienarbeit Nr. 1177/14, 2014

Gebauer, Oliver: Entwicklung und Inbetriebnahme eines optischen 3D-Messsystems, Master-Thesis Nr. 604/15, 2016

Hopkins, Derek: Optimierung und Validierung eines Simulationsmodells für das Verhalten von Ladungssicherungssystemen, Bachelor-Thesis Nr. 1253/15, 2015

Junietz, Philipp: Use-of-potential Analysis of Advanced Driver Assistance Systems based on Real World Accident Data, Master-Thesis Nr. 562/14, 2014

Keune, Alexander: Entwicklung einer Regelung für eine hochdynamische Beschleunigungsanlage, Bachelor-Thesis Nr. 1191/14, 2014

Kilian, Mirko: Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines vertikal anregbaren Ladungssicherungsprüfstandes, Master-Thesis Nr. 550/14, 2014

Langhammer, Felix: Untersuchung der Wirksamkeit von Niederzurrverfahren an FIBCs, Bachelor-Thesis Nr. 1232/15, 2015

Li, Runa: Modellierung und Bewertung der lateralen Fahrstabilität von Lkw, Master-Thesis Nr. 584/15, 2015

Luft, Albert: Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung zur Realisierung von vertikalen Beschleunigungen einer beweglichen Plattform, Bachelor-Thesis Nr. 1172/13, 2013

Niess, Sammy Florian: Optimierung eines Messsystems zur Erfassung von Verformungen und Bewegungen, Bachelor-Thesis Nr. 1212/15, 2015

Przyklick, Alexander: Untersuchung der Wirksamkeit von Direktzurrverfahren an FIBCs, Bachelor-Thesis Nr. 1229/15, 2015

Reinicke, Toni: Entwicklung eines Systems zum Messen von Belastungen und Beanspruchungen formschlüssiger Ladungssicherungsmaßnahmen, Master-Thesis Nr. 607/15, 2016

Ries, Felix: Analyse der Richtlinien/Normen zur Ermittlung der erforderlichen Sicherungsmaßnahmen aus dem Bereich Straßen-,Luft- und Seeverkehr, Bachelor-Thesis Nr. 1201/14, 2014

Rouse, Alexander: Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Verformungsverhaltens von FIBCs, Bachelor-Thesis Nr. 1247/15, 2015

Rösicke, Steffen: Untersuchung der Reliabilität und der Reproduzierbarkeit von Versuchen mit plastisch verformbaren Ladegütern, Bachelor-Thesis Nr. 1242/15, 2015

Scherer, Timo: Inbetriebnahme und Potenzialabschätzung der pneumatischen Aktorik im Ladungssicherungsprüfstand, Master-Thesis Nr. 550/14, 2014

Schlüter, Kristen: Analyse der Vermarktungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse des Ladungssicherungsprojektes, Studienarbeit Nr. 1256/15, 2015

Walther, Lukas: Entwicklung eines Einfahr-sowie Reinigungsverfahrens für Fahrbahnen am Rutschsimulationsprüfstand, Bachelor-Thesis Nr. 1248/15, 2015

Wilczynski, David: Identifikation und Bewertung potenzieller Fehlerursachen für die Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Untersuchung von Ladungssicherungsmaßnahmen, Bachelor-Thesis Nr. 1199/14, 2014

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Kamil Jan Klonecki
Geburtsdatum: 01.04.1987
Geburtsort: Thorn, Polen

Schulzeit

1998 –2003 Gymnasium, Helene-Lange-Schule in Frankfurt Höchst
2003 2006 Gymnasium, Friedrich Dessauer Gymnasium in Frankfurt Höchst

Studium

2007 – 2010 Studiengang Maschinenbau
Mechanical and Process Engineering
Technische Universität Darmstadt
Abschluss: BACHELOR OF SCIENCE (B.Sc.)

2010 2013 Studiengang Maschinenbau
Mechanical and Process Engineering
Technische Universität Darmstadt und Tongji University,
Shanghai China
Abschluss: MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

Berufstätigkeit

2013 – 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeug-
technik der Technischen Universität Darmstadt

seit 2016 Test and Validation Lead Engineer für Fahrerassistenz-
systeme/Hochautomatisiertes Fahren bei der Continental
AG, Frankfurt am Main